Сварка

В МАШИНОСТРОЕНИИ

СПРАВОЧНИК 1

Сварка
В МАШИНОСТРОЕНИИ

Справочник в 4 томах

Редакционная коллегия:
Заслуженный деятель науки и техники РСФСР,
Герой Социалистического Труда,
чл.-кор. АН СССР,
лауреат Государственной премии Г. А. НИКОЛАЕВ (председатель);
Заслуженный деятель науки и техники РСФСР,
д-р техн. наук Н. А. ОЛЬШАНСКИЙ;
лауреат Ленинской премии, д-р техн. наук. А. И. АКУЛОВ;
д-р техн. наук В. А. ВИНОКУРОВ;
канд. техн. наук Ю. Н. ЗОРИН.

Сварка
В МАШИНОСТРОЕНИИ

ТОМ 1

Под редакцией д-ра техн. наук
Н. А. ОЛЬШАНСКОГО

Москва «Машиностроение» 1978

ББК 30.616
С24
УДК 621.791(03)

Авторы:

Канд. техн. наук К. В. ВАСИЛЬЕВ, канд. техн. наук В. И. ВИЛЛЬ, д-р техн. наук, проф. В. Н. ВОЛЧЕНКО, д-р техн. наук, проф. А. А. ЕРОХИН, д-р техн. наук, проф. Н. Ф. КАЗАКОВ, инж. Н. Н. КРЮКОВСКИЙ, д-р техн. наук И. Д. КУЛАГИН, канд. техн. наук А. П. ЛОПАТКО, канд. техн. наук И. И. ЛЫЧКО, канд. техн. наук Г. В. НАЗАРОВ, канд. техн. наук Ю. И. НЕКРАСОВ, д-р техн. наук, проф. Н. А. ОЛЬШАНСКИЙ, д-р техн. наук, проф. Б. Д. ОРЛОВ, канд. техн. наук С. А. ОСТРОВСКАЯ, д-р техн. наук А. В. ПЕТРОВ, академик АН СССР Н. Н. РЫКАЛИН, д-р техн. наук, проф. В. С. СЕДЫХ, канд. техн. наук В. С. СИДОРУК, канд. техн. наук И. И. СУЩУК-СЛЮСАРЕНКО, канд. техн. наук А. В. ТИХОМИРОВ, д-р техн. наук А. А. УГЛОВ, д-р техн. наук, проф. М. Х. ШОРШОРОВ, канд. техн. наук Ф. В. ШУБИН, канд. техн. наук А. А. ЧАКАЛЕВ

Рецензенты:

Е. И. БЕРЕСТОВОЙ, Г. А. МАСЛОВ, О. И. СТЕКЛОВ, В. Ф. ТЮРИН, Д. М. ШАШИН, Н. В. ШИГАНОВ

Сварка в машиностроении: Справочник в 4-х т./Редкол.: Г. А. Николаев (пред.) и др. — М.: Машиностроение, 1978 —
С24 Т. 1/Под ред. Н. А. Ольшанского. 1978. 504 с., ил.
В пер.: 2 р. 60 к.

В первом томе справочника приведены сведения по физическим основам и металлургии сварки, расчету тепловых процессов, определению режимов сварки, свариваемости и структуре сварного соединения, сварке плавлением, контактной сварке, резке и специальным видам сварки металлов.

Справочник предназначен для инженеров и техников, работающих в области сварочного производства на заводах, в исследовательских и проектных институтах, строительных и монтажных организациях.

С $\frac{31206\text{-}602}{038(01)\text{-}78}$ подписное

ББК 30.616
6П4.3

© Издательство «Машиностроение», 1978 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 7

Глава 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ И КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ (*Волченко В. Н.*) 9

Физические основы сварки 9
Классификация процессов сварки 11
Оценка эффективности сварочных процессов 12
Список литературы 21

Глава 2. РАСЧЕТЫ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ (*Рыкалин Н. Н., Углов А. А.*) 22

Нагрев металла сварочной дугой 22
Нагрев металла плазменной дугой 29
Нагрев металла газовым пламенем 31
Нагрев металла потоками частиц и излучения 37
Нагрев основного металла при электрошлаковой сварке . . 41
Нагрев основного металла при дуговой сварке и наплавке 42
Плавление металла при дуговой сварке 48
Нагрев стержней при контактной сварке 50
Нагрев стержней при стыковой сварке трением 56
Нагрев деталей при ультразвуковой сварке 59
Расчеты энергетических условий образования соединения при сварке взрывом 60
Список литературы 61

Глава 3. МЕТАЛЛУРГИЯ СВАРКИ (*Ерохин А. А.*) 62

Металлургические реакции при сварке 62
Термодинамические оценки протекания реакций при сварке 64
Кинетика реакций при сварке 67
Расчетные оценки состава металла шва 71
Влияние параметров режима на состав металла шва 77
Взаимодействие металла с газами при сварке 79
Выделение газов из сварочной ванны и образование пор 85
Взаимодействие металла со шлаком 89
Список литературы 96

Глава 4. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ, ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И КРИТЕРИИ РАСЧЕТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖИМА СВАРКИ (*Шоршоров М. Х.*) 97

Фазовые и структурные превращения в металлах при сварке и условия их протекания 97
Кристаллизация сварочной ванны 99

Процессы в околошовной зоне 108
Критерии выбора технологии и режимов сварки и последующей термической обработки сварных соединений 116
Список литературы 134

Глава 5. СВАРИВАЕМОСТЬ И СТРУКТУРА МЕТАЛЛА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ *(Шубин Ф. В.)* 135

Список литературы 143

Глава 6. СВАРКА ПЛАВЛЕНИЕМ 144

Ручная дуговая сварка плавящимся электродом *(Крюковский Н. Н.)* 144
Сварка под флюсом *(Островская С. А.)* 164
Сварка в защитных газах *(Петров А. В.)* 196
Электрошлаковая сварка *(Сидорук В. С., Сущук-Слюсаренко И. И., Лычко И. И.)* 259
Список литературы 284

Глава 7. КОНТАКТНАЯ СВАРКА *(Орлов Б. Д., Чакалев А. А.)* 285

Способы сварки и область их применения 285
Особенности формирования соединений 288
Нагрев металла 290
Удаление поверхностных пленок 305
Пластическая деформация металла при сварке 307
Дефекты сварки и причины их образования 310
Основы выбора режимов сварки 313
Список литературы 318

Глава 8. РЕЗКА МЕТАЛЛОВ 319

Газопламенная сварка и кислородная резка *(Некрасов Ю. И., Тихомиров А. В.)* 319
Электрическая резка *(Васильев К. В.)* 339
Список литературы 350

Глава 9. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ СВАРКИ 351

Сварка давлением *(Шоршоров М. Х.)* 351
Холодная сварка *(Шоршоров М. Х.)* 358
Сварка взрывом *(Седых В. С.)* 362
Ультразвуковая сварка *(Ольшанский Н. А.)* 375
Сварка трением *(Вилль В. И.)* 387
Диффузионная сварка *(Казаков Н. Ф.)* 401
Электронно-лучевая сварка *(Ольшанский Н. А.)* 411
Сварка световым лучом *(Ольшанский Н. А.)* 439
Плазменная сварка *(Кулагин И. Д.)* 447
Сварка и резка под водой *(Лопатко А. П.)* 461
Атомно-водородная и термитная сварка *(Лопатко А. П.)* 470
Сварка в микроэлектронике *(Назаров Г. В.)* 479
Список литературы 495
Предметный указатель 496

ПРЕДИСЛОВИЕ

Развитие науки и техники в области сварки достигло значительных успехов. Сварщики СССР к концу девятой пятилетки добились производства 58 млн. тонн сварных конструкций в год и повысили уровень автоматизации сварочных процессов в народном хозяйстве до 60%.

Десятая пятилетка требует от сварщиков дальнейшего повышения эффективности и качества всех сварочных работ, увеличения производительности труда на основе внедрения в производство комплексной автоматизации и механизации и передовой технологии, а также достижений науки.

Коллективы научно-исследовательских организаций и производственных предприятий СССР, деятельность которых направляется Институтом электросварки им. Е. О. Патона, разрабатывают прогрессивные технологические процессы сварки, совершенствуют сварочное оборудование и аппаратуру, создают на заводах автоматизированные линии, участки и цеха, разрабатывают новые методы соединения и резки всевозможных материалов, совершенствуют организацию и экономическую эффективность производства.

Сварка — ведущий технологический процесс в машиностроении. Объем информации в области сварки особенно увеличился в связи с появлением новых конструкционных материалов, использованием сварки в различных отраслях техники и разработкой прогрессивных способов сварки.

«Сварка в машиностроении» является комплексным межотраслевым справочником. Он подготовлен на основании официальных и литературных данных с учетом опыта передовых машиностроительных предприятий и научно-исследовательских институтов, изменений в действующих стандартах, технических условиях и методах расчета. В справочнике отражены задачи в области совершенствования сварочного производства, поставленные XXV съездом Коммунистической партии Советского Союза.

В составлении, рецензировании и редактировании справочника участвуют более семидесяти ведущих ученых и высококвалифицированных специалистов.

В первом томе справочника изложена теория сварочных процессов, раскрывающая основные физические и химические явления, сопровождающие различные методы сварки; даны классификация источников энергии и способов сварки и расчеты параметров режима сварки, рассмотрены тепловые и металлургические процессы, а также особенности кристаллизации и свариваемости. Приведены сведения об основных способах сварки (ручной дуговой, автоматической и полуавтоматической дуговой, в защитных газах электрошлаковой, контактной, газопламенной и др.). Рассмотрены специальные методы сварки: холодная, взрывом, ультразвуковая, трением, диффузионная, электронно-лучевая, дуговая и в вакууме, светолучевая, плазменная, термитная и др.

Во втором томе приведены сведения по материалам для сварки, наплавки и резки, по присадочным материалам, электродам для дуговой сварки, флюсам для сварки и наплавки. Изложены техника и технология сварки сталей различных структурных классов, тугоплавких и цветных металлов, сплавов на основе титана, алюминия, никеля и меди, чугуна, разнородных металлов и сплавов; описана технология наплавки износостойких и специальных сталей и сплавов, а также сварки и пайки неметаллических материалов и неметаллических материалов с металлами.

В третьем томе рассмотрены свойства сварных соединений при статических и переменных нагрузках, при низких и высоких температурах, в условиях коррозионного воздействия. Изложены методы расчета и проектирования сварных соединений и конструкций, а также методы определения их прочности и пластичности; даны расчетные нормы, принятые в различных отраслях промышленности, способы определения сварочных деформаций и напряжений, а также приемы их уменьшения. Приведены методики определения сопротивляемости сварных соединений образованию в них трещин при сварке. Описаны рациональные технологические процессы при изготовлении сварных конструкций, принципы механизации и автоматизации сварочного производства. Изложены вопросы технического нормирования и экономики сварочного производства, проектирования сварочных цехов и охраны труда.

В четвертом томе приведены сведения по источникам питания для сварки, наплавки и резки; трансформаторам, генераторам и специальным устройствам для питания и возбуждения дуги, а также по оборудованию для дуговой сварки в защитных газах, сварки под флюсом, электрошлаковой и контактной сварки, для специальных способов сварки и наплавки, газопламенной сварки, газопламенной и дуговой резки. Рассмотрена пайка металлов, технология и оборудование для осуществления этого процесса. Изложены методы контроля качества сварных соединений и конструкций: радиационные, акустические, магнитные, капиллярные и другие; приведены стандарты, используемые в сварочном производстве.

Глава 1

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ И КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СВАРКИ

Монолитность сварных соединений достигается обеспечением физико-химических, атомно-молекулярных связей между элементарными частицами соединяемых тел.

В технике используют различные виды разъемных и неразъемных соединений твердых тел. Неразъемные соединения могут быть выполнены монолитными (сплошными) и немонолитными. К монолитным следует относить соединения, получаемые сваркой, пайкой или склеиванием, а к немонолитным — клепаные соединения.

Сварку, пайку и склеивание используют для соединения металлов и неметаллов между собой и в разнородных сочетаниях.

Элементарные связи удерживают каждый атом внутри кристалла симметрично направленными силами. На свободной поверхности тела атом неуравновешен вследствие отсутствия или ослабления связей с внешней стороны (рис. 1, *а*). Это явление увеличивает потенциальную энергию $E_п$ поверхностного слоя. При соединении тел требуется извне механическая или тепловая энергия $E_г$ для преодоления энергетического барьера (рис. 1, *б*).

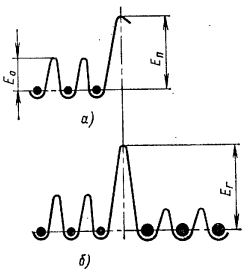


Рис. 1. Энергетический барьер потенциальной энергии системы атомов у поверхности кристалла (*а*) и на границе твердой и жидкой фаз в начальный период их контактирования (*б*)

Внешняя механическая энергия деформации будет затрачена на преодоление сил отталкивания, возникающих между поверхностными атомами сближаемых тел. Когда расстояния между ними будут близки к межатомным, в решетке кристаллов возникают квантовые процессы взаимодействия электронных оболочек атомов. После этого общая энергия системы начнет снижаться до уровня, соответствующего энергии $E_о$ атомов в решетке целого кристалла, т. е. будет получено монолитное соединение.

Тепловая энергия, сообщенная поверхностным атомам при повышении температуры, увеличивает флуктуационную вероятность развития процессов электронного взаимодействия и облегчает процесс соединения.

Трехстадийность процесса сварки связана с тем, что ее (так же как и пайку) можно отнести к классу так называемых топохимических реакций. Последние на микроучастках отличаются двухстадийностью процесса образования прочных связей между атомами соединяемых веществ (рис. 2). В макрообъемах процесс сварки завершается третьей стадией — диффузией.

На первой стадии *А* развивается физический контакт, т. е. осуществляется сближение соединяемых веществ на расстояния, требуемые для межатомного взаимодействия, а также происходит подготовка поверхностей к взаимодействию. На второй стадии *Б* — стадии химического взаимодействия — заканчивается процесс образования прочного соединения на микроучастке.

Диффузионные процессы развиваются почти одновременно с прорастанием дислокаций при пластической деформации контактирующих поверхностей либо при наличии высокой температуры.

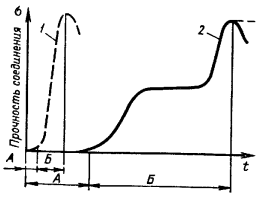


Рис. 2. Кинетика изменения прочности соединения σ при быстром (*1*) и медленном (*2*) развитии физического контакта (*А*) и химического взаимодействия (*Б*) в зависимости от длительности сварки *t*

Практическое получение монолитных соединений осложнено двумя факторами:

свариваемые поверхности имеют микронеровности, поэтому при совмещении поверхностей контактирование возможно лишь в отдельных точках;

свариваемые поверхности имеют загрязнения, так как на любой поверхности твердого тела адсорбируются атомы внешней среды.

Для качественного соединения изделий необходимо обеспечить контакт по бо́льшей части стыкуемых поверхностей и активацию их.

Активация поверхностей состоит в том, что поверхностным атомам твердого тела сообщается некоторая энергия, необходимая для обрыва связей между атомами тела и атомами внешней среды, насыщающими их свободные связи; для повышения энергии поверхностных атомов до уровня энергетического барьера схватывания, т. е. для перевода их в активное состояние.

Такая энергия активации может в общем случае быть сообщена в виде теплоты (термическая активация), упругопластической деформации (механическая активация), электронного облучения и других видов воздействия.

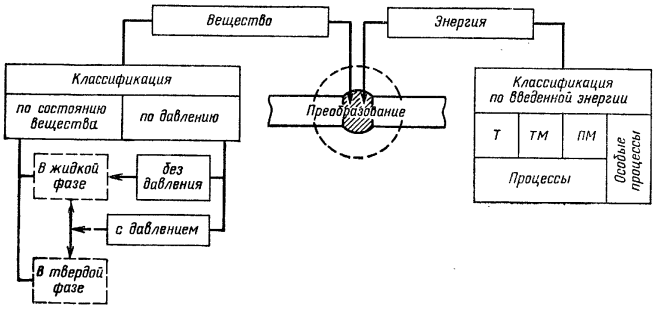


Рис. 3. Схема-модель, поясняющая термодинамическое определение и классификацию процессов сварки: *Т*, *ТМ*, *ПМ* — термические, термомеханические и прессово-механические процессы

Определение процесса сварки целесообразно дать исходя из анализа физико-химических особенностей получения соединений. В зоне сварки можно установить наличие двух основных физических явлений, связанных с термодинамически необратимым изменением формы энергии и состояния вещества (рис. 3): введения и преобразования энергии; движения (превращения) вещества.

Вид, интенсивность вводимой энергии и характер ее преобразования — это главное, что определяет вид процесса сварки, причем введение энергии всегда является необходимым условием сварки, так как без этого невозможна активация соединяемых поверхностей.

Введение вещества необходимо только при некоторых видах сварки плавлением и пайки, причем энергия в этих случаях может быть введена также с расплавленным материалом. Характер движения вещества в зоне сварки сильно меняется от процесса к процессу. Движение значительно при сварке плавлением, особенно при наличии присадочного материала, и при пайке. При сварке давлением с нагревом движение материала в зоне стыка незначительное, и существенна только диффузия вещества через стык. Холодная сварка реализуется практически без движения вещества, если не учитывать переползания дислокаций и выхода их на поверхность.

Исходя из сказанного, можно дать следующее термодинамическое определение процесса сварки [1].

Сварка — это процесс получения монолитного соединения материалов за счет термодинамически необратимого превращения тепловой и механической энергии и вещества в стыке.

Склеивание, цементирование и другие соединительные процессы, обеспечивающие монолитность соединения, в отличие от сварки и пайки, как правило, не требуют специальных источников энергии. Они реализуются обычно только за счет введения (преобразования) вещества (клея, цемента и т. д.)

Кроме самого общего, термодинамического, возможны и другие определения сварки. Например, в технологическом аспекте, согласно ГОСТ 2601—74, сварка — это процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между свариваемыми частями при их местном нагреве или пластическом деформировании, или совместном действии того и другого.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ СВАРКИ

Согласно схеме термодинамических превращений (см. рис. 3) целесообразно выделить при классификации процессов сварки три основных физических признака: форму вводимой энергии, наличие давления и вид инструмента — носителя энергии. Остальные признаки условно отнесены к техническим и технологическим (табл. 1). Такая классификация использована в ГОСТ 19521—74. По виду вводимой в изделие энергии все основные сварочные процессы, включая сварку, пайку и резку, разделены (табл. 2) на термические (Т), термомеханические (ТМ) (или точнее термопрессовые) и механические (М) (точнее — прессово-механические). Признак классификации по наличию давления применим только к сварке и пайке.

Форма энергии, применяемой в источнике энергии для сварки (электрическая, химическая и др.), как классификационный признак в стандарте не использована, так как она характеризует главным образом не процесс, а оборудование для сварки.

Т-процессы осуществляются без давления (сварка плавлением), остальные — обычно только с давлением (сварка давлением). Указанные в табл. 1 термины (класс, метод, вид) условные, но, войдя в классификацию, они позволяют в дальнейшем вести четкую систему типизации процессов сварки. Термин «процесс» использован как независимый от классификационных групп.

Все известные в настоящее время процессы сварки металлов осуществляются за счет введения только двух видов энергии — термической и механической или при их сочетании. Поэтому в четвертый подкласс особых процессов пока могут быть включены только нейтронная сварка пластмасс и (условно) склеивание, которое происходит без существенного введения энергии извне. В табл. 2 эти процессы не указаны, так же как сварка восстановлением из солей металлов, электролитическая сварка, сварка напылением и другие весьма редко используемые процессы.

1. Основные признаки и ступени классификации процессов сварки

Группы признаков	Наименование признаков	Ступени классификаций
Физические (общие для всех видов сварки)	Форма энергии, вводимой при сварке и используемой для образования соединения	Классы энергии
	Наличие давления при сварке	Классы давления*
	Вид источника энергии—инструмента, определяющего характер нагрева или механического воздействия непосредственно при образовании соединения	Виды
Технические	Защита зоны сварки и зависящие от нее факторы Непрерывность процесса Степень механизации процесса	Методы и разновидности
Технологические	Признаки устанавливают для каждого метода сварки отдельно	Способы и приемы

* В ГОСТ 19521—74 классы давления не использованы, а формулировка признаков дана более сжато.

Под сварочными процессами в настоящее время понимают достаточно широкую группу технологических процессов соединения, разъединения (резки) и локальной обработки материалов, как правило, с использованием местного нагрева изделий. Примерами сварочных процессов могут служить: сварка, наплавка, пайка, пайка-сварка, сварка-склейка, напыление, спекание, термическая резка и т. д. Отличительной чертой сварочных процессов является то, что они «термические» и обычно идут с введением в место обработки термической или термомеханической энергии. Если же вводится только механическая энергия, то в значительной мере используется именно эффект ее преобразования в тепловую, термическую форму.

Поскольку формы вводимой энергии являются наиболее общими и существенными признаками всех сварочных процессов, эти признаки учтены в последних строках классификационной таблицы.

Дуга, луч, газовое пламя — внешние носители энергии, от которых энергия передается в изделие тем или иным способом. При термитной сварке разогрев происходит за счет внутреннего источника в результате преобразования в теплоту химической энергии, выделяемой при реакции горения термита. Для всех термических процессов сварки плавлением независимо от вида носителя энергии — инструмента — встык она вводится всегда путем расплавления металла.

В термомеханических и механических процессах преобладают внутренние носители энергии, в которых ее преобразование в теплоту происходит главным образом вблизи контакта соединяемых изделий — стыка.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

Обобщенный баланс энергии необходим для количественной оценки передачи и преобразования энергии при разных видах сварочных процессов. Баланс включает следующие основные ступени передачи энергии ε (рис. 4): сеть питания; источник энергии для сварки или трансформатор энергии *ТЭ*; носитель энергии — инструмент, передающий энергию от трансформатора к зоне сварки (резки или напыления); изде лие — стык соединяемых изделий.

2. Классификация источников энергии и процессов сварки по физическим признакам

Источники энергии	Классы процессов		
	Термические Т-процессы	Термопрессовые ТП-процессы (термомеханические)	Прессовомеханические ПМ-процессы (механические)
	Виды сварки		
Термические			
А. Внешние источники:			
фотонный луч	Лазерно-лучевая Световая	Резерв	
электронный луч	Электронно-лучевая	Электронно-лучевая с давлением	
плазменный луч	Плазменно-лучевая Ионно-лучевая	Резерв	
электрическая дуга	Дуговая	Дугопрессовая	
тлеющий разряд	Тлеющим разрядом	В тлеющем разряде с давлением	
электрорасплав	Электрошлаковая	Резерв	
расплав	Литейная		
реакция термита	Термитная	Термитно-прессовая	
газовое пламя	Газовая	Газопрессовая	
нагретый газ	Газотепловая (пл)	Газотепловая с давлением	
нагретый инструмент		Термокомпрессионная	
печной нагрев	Резерв	Печная с давлением	
атомная энергия		Нейтронная с давлением (пл)	
Б. Внутренние источники:			
электрическая индукция	Индукционная	Индукционно-прессовая	
электрическая емкость	Резерв	Электроемкостная (пл)	
электрический контакт	—	Контактная	
Механические			
Прессовый контакт			Вакуумным схватыванием Холодная
Прессовомеханический контакт			Трением Ультразвуковая
Трущийся контакт			Взрывом
Вибрирующий контакт			
Ударный контакт			
Прочие сварочные процессы (подробно не классифицированы)	Т-пайка	ТП-пайка	ПМ-пайка
	Термическая и термохимическая резка и напыление	Термомеханическая резка и напыление	—

Примечания: 1. Слово «Резерв» показывает, что процесс принципиально возможен, но пока не реализован. Прочерк означает, что для данного источника энергии процесс принципиально не возможен.

2. Буквы (пл) относятся к сварке пластмасс.

3. Источник атомной энергии показан как термический условно, чтобы не вводить графу особых процессов.

4. Порядок расположения источников энергии в группе А примерно соответствует уменьшению их интенсивности.

В балансе удобно использовать удельную энергию ε, Дж/м², определяемую в расчете на единицу площади стыка.

Энергия, получаемая сварочной установкой от сети питания ($\varepsilon_{вх}$), может быть использована непосредственно на сварку ($\varepsilon_{св}$) и на вспомогательные операции ($\varepsilon_{всп}$). Примерный анализ затрат энергии на собственно сварочные и вспомогательные операции показан на рис. 5.

На выходе *ТЭ* энергия передается источником инструменту, вводящему ее затем в зону сварки. С учетом потерь $П_1$ в *ТЭ* энергия $\varepsilon_{св}$ составит

$$\varepsilon_{св} = \varepsilon_{вых} = \varepsilon_{вх} - П_1.$$

Учитывая потери $П_2$ при передаче энергии к изделию и потери $П_3$, $П_4$ на теплопроводность в изделие и на унос, можно найти $\varepsilon_и$ — энергию, введенную в изделие, и $\varepsilon_{ст}$ — энергию, преобразованную непосредственно в зоне стыка:

$$\varepsilon_и = \varepsilon_{св} - П_2; \quad \varepsilon_{ст} = \varepsilon_и - (П_3 + П_4).$$

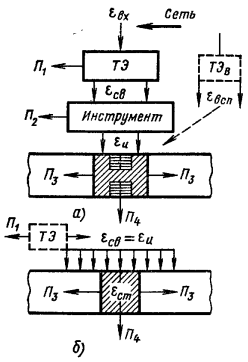


Рис. 4. Обобщенная схема баланса энергии сварочного процесса:

а — внешний источник; *б* — внутренний источник. Горизонтальной штриховкой условно показан процесс расплавления

Потери уноса $П_4$ характерны главным образом для резки, но имеют место и при высокоинтенсивных процессах из-за испарения материала. Отдельные элементы в схеме передачи энергии в зависимости от вида процесса существенно изменяются и могут даже отсутствовать совсем. Например, носителем энергии — инструментом — в термических процессах является луч, дуга или пламя, а при контактной сварке — носитель — это сам металл в зоне контакта.

Каждая ступень передачи энергии от источника до стыка может иметь свой КПД. В теории распространения теплоты при сварке широко используют эффективный $\eta_и$ и термический η_t КПД процесса, которые в обозначениях данной схемы выражаются

$$\eta_и = \frac{\varepsilon_и}{\varepsilon_{св}}; \quad \eta_t = \frac{\varepsilon_{ст}}{\varepsilon_и}.$$

Кроме того, целесообразно использовать термодинамический КПД процесса

$$\eta_{тд} = \frac{\varepsilon_{ст}}{\varepsilon_{св}} = \eta_и \eta_t,$$

который показывает отношение минимальной удельной энергии $\varepsilon_{ст}$, необходимой в зоне сварки для выполнения данного соединения, к требуемой энергии источника на выходе трансформатора *ТЭ*. Удельная энергия $\varepsilon_{ст}$, Дж/м² соответствует в данном случае изменению энергосодержания зоны стыка, отнесенному к площади получаемого за счет этой энергии соединения. В частном случае, например при дуговой сварке листов, $\eta_{тд}$ по форме аналогичен КПД проплавления. Анализ значений $\varepsilon_{ст}$ и $\eta_{тд}$ позволяет выявить энергетические особенности образования сварных соединений при использовании разных источников и форм энергии.

Схема баланса энергии ТП- и ПМ-процессов. Обобщенный баланс справедлив для всех источников энергии, как внешних, так и внутренних. Большинство Т- и ТП-процессов осуществляется с внешними источниками. Примеры балансов для них приведены в соответствующих главах справочника. Использование давления при сварке теми же Т-источниками вносит в баланс небольшие коррективы (1—5% от введенной термической энергии).

Внутренний источник энергии рассматриваем как некоторый активный объем в общем случае с одинаковой глубиной в обе стороны от стыка.

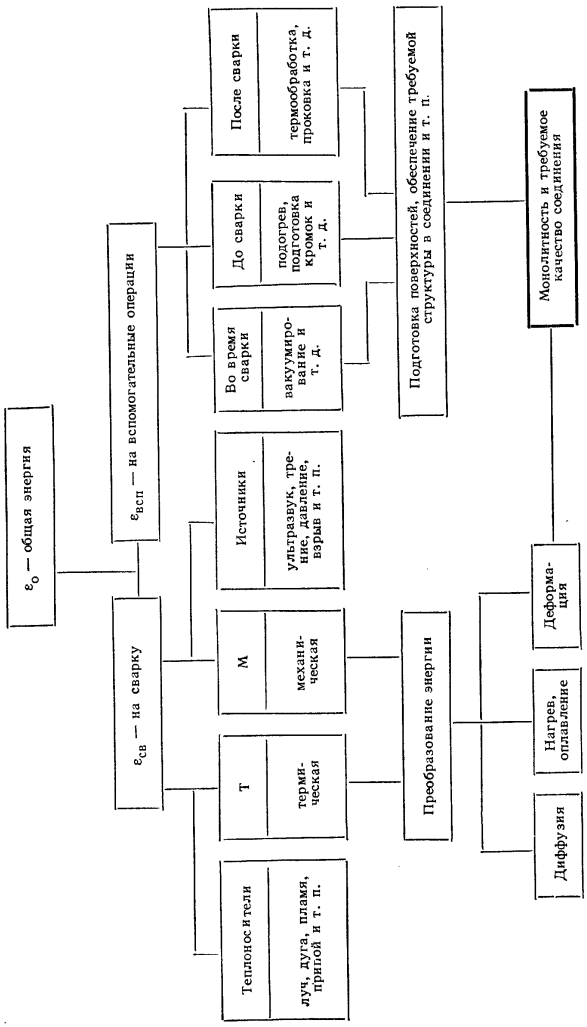


Рис. 5. Структурная схема видов основной и вспомогательной энергии при сварке

Считаем, что в активном объеме происходит преобразование вводимой энергии из одной формы в другую (как правило, тепловую). В этом случае энергия $\varepsilon_{ст}$, Дж/мм³, требуемая для сварки (или резки) единицы контактной площади, может быть приближенно определена как произведение среднего единичного активного объема V, мм³/мм² на его среднее энергосодержание ΔH, Дж/мм³. Принимая микротермическую гипотезу образования сварного соединения как результат местного повышения температуры в активном объеме, определяем ΔH как произведение удельного теплосодержания $c\gamma$, Дж/мм³·°С на среднюю температуру $\Delta T°$ активного объема. Тогда $\varepsilon_{ст} = V\Delta H = Vc\gamma\Delta T°$.

Например, для холодной сварки алюминия имеем глубину активной зоны до 1 мм от стыка. Тогда $V = 2$ мм³/мм²; $\Delta T \approx 0{,}8T_{пл} \approx 500$ °С; $c\gamma = 5 \cdot 10^{-3}$ Дж/мм²·°С.

Имеем $\varepsilon_{ст} = Vc\gamma\Delta T° = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 500 = 5$ Дж/мм². Такой же порядок величин $\varepsilon_{ст}$ получим при оценке требуемой энергии для сварки взрывом: для алюминия 10 Дж/мм², для молибдена ~ 50 Дж/мм². Некоторое увеличение $\varepsilon_{ст}$ получаем для сварки ультразвуком и особенно трением, где глубина и активный объем могут быть значительными.

Сравнивая $\varepsilon_{ст}$ с энергией $\varepsilon_{св}$, затрачиваемой на выполнение сварки, получаем термодинамический КПД процесса $\eta_{тд} = \varepsilon_{ст}/\varepsilon_{св}$. Например, для сварки взрывом 1 мм² соединения пластин толщиной ~ 1 мм требуется количество взрывчатого вещества (ВВ): для алюминия $G \simeq 0{,}01$ г/мм²; для молибдена $G \simeq 0{,}1$ г/мм². Учитывая удельную энергию ВВ, равную примерно $\Delta H = 6000$ Дж/г, получаем: $\varepsilon_{св} = G \cdot \Delta H = 0{,}01 \cdot 6000 = 60$ Дж/мм² для алюминия и $\varepsilon_{св} = 600$ Дж/мм² для молибдена.

Таким образом, $\eta_{тд}$ для сварки взрывом оказывается равным примерно 0,1. Для холодной сварки $\varepsilon_{св} \approx 10 \div 30$ Дж/мм², а $\eta_{тд}$ соответственно равно 0,5—0,15.

Приведенные оценки величин энергий $\varepsilon_{ст}$, $\varepsilon_{св}$ и $\eta_{тд}$ весьма приближенные. Практическая полезность подобных расчетов связана с тем, что получаемые значения КПД $\eta_{тд}$ весьма хорошо отражают сравнительную энергоемкость разных процессов и ориентируют на использование менее энергоемких методов.

Оценка эффективности источников энергии. Для правильного выбора того или иного сварочного процесса применительно к конкретному изделию следует учитывать по крайней мере три основных фактора: техническую возможность применения процесса; качество и надежность получаемого соединения; энергетическую и экономическую эффективность сварочного процесса.

Первый фактор должен быть выполнен безусловно. Вторые два фактора следует учитывать так, чтобы найти оптимальное решение в каждом конкретном случае. Для правильного и обоснованного учета факторов качества и надежности соединений одновременно со степенью эффективности применяемого процесса сварки нужна единая методика их количественной оценки. Эффективность процессов сварки плавлением оценивают обычно такими показателями, как эффективный и термический КПД, коэффициенты расплавления и наплавки и т. п. Источники сварочного нагрева характеризуют обычно удельным тепловым потоком в пятне нагрева q_{2max} Вт/см² и коэффициентом сосредоточенности k. Оценивают также удельные затраты на 1 м длины шва или на 1 кг наплавленного металла.

Сравнение термических источников энергии для сварки (рис. 6) показывает, что наибольшую удельную мощность в пятне нагрева имеют лучевые источники, для которых q_{2max} примерно $1 \cdot 10^{10}$ Вт/см². Однако их применение для сварки ограничено верхним пределом $1 \cdot 10^{7}$ Вт/см² для электронного и фотонного луча (табл. 3). При более высоких плотностях энергии в пятне нагрева сварка невозможна — происходит испарение материала; возможна резка и размерная обработка (лучевое фрезерование) изделий.

Однако приведенные показатели не позволяют сравнивать между собой процессы разных классов — термические, термомеханические и механические. В то же время часто имеется возможность выполнить одно и то же соединение разными методами сварки, а также пайкой или склеиванием. Основная задача любого из этих трех процессов — получение определенной площади качественно соединенных материалов. Поэтому целесообразно применять удельные показатели эффективности, отнесенные к единице площади соединения [1, 2]. Подсчет удельных затрат энергии, труда или средств на единицу площади получаемого соединения дает возможность получить универсальные количественные критерии эффективности любого способа соединения (табл. 4).

Основой применения этих показателей служит приведенная выше классификация сварочных процессов (см. табл. 2) и обобщенная схема баланса для источника сварочной энергии (см. рис. 2).

Основные показатели эффективности сварочных процессов (табл. 4) условно разделены на три группы: энергетические, экономические и показатели полной эффективности процесса с учетом качества или надежности получаемых соединений. Практически полезно также сравнение величин, обратных $C_м$. Они могут быть выражены как «наработка» в мм² получаемого соединения на единицу затрат.

Расчет значений $\varepsilon_{св}$ для разных способов сварки коррозионно-стойкой стали

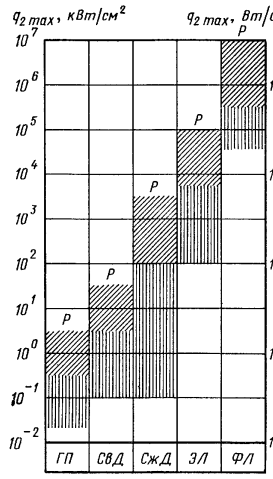


Рис. 6. Удельная мощность различных источников энергии сварочных процессов в пятне нагрева. Вертикальная штриховка соответствует сварке, наклонная — резке (P). Обозначения:

ГП — газовое пламя; *СвД* — свободная дуга; *СжД* — сжатая дуга; *ЭЛ* — электронный луч; *ФЛ* — фотонный луч

3. Энергетические характеристики основных термических источников энергии для сварки и резки

Источники энергии	Температура, К	Наименьшая площадь нагрева, см²	Наибольшая плотность энергии в пятне q_2, Вт/см²
Газовое пламя	3 000— 3 500	$1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{4}$
Топливно-плазменное пламя	4 000— 5 000	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{4}$
Дуга в парах:			
щелочных металлов	4 500— 5 000	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{5}$
железа	5 000— 6 000		
Дуга в газах:			
водород, азот	5 000— 8 000	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{5}$
аргон, гелий	10 000—20 000		
Микроплазма	—	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{7}$
Электронный луч		$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{8}$
Фотонный луч		$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{9}$

Примечание. Понятие температуры для луча не характерно, так как движение частиц в основном направленное, а не хаотичное.

4. Основные удельные показатели эффективности сварочных процессов

Наименование	Формула
I. Энергетические показатели	
Общая удельная энергия E, Дж/мм² S — площадь стыка, мм²	$\varepsilon_0 = \frac{\Sigma (E_{св} + E_{всп})}{S}$
Удельная энергия, Дж/мм²: $\varepsilon_{св}$ — сварочная; $\varepsilon_и$ — введенная в изделие; $\varepsilon_{ст}$ — в стыке; $\varepsilon_{вх} = \varepsilon_{пит}$ — на входе $ТЭ$	$\varepsilon_{св} = \frac{E_{св}}{v\delta} = \frac{q}{v\delta}$ q — мощность, Дж/с; v — скорость сварки, мм/с; δ — толщина металла, мм; $\varepsilon_и = \varepsilon_{св}\eta_и$ $\varepsilon_{ст} = \varepsilon_и\eta_l$
Удельные потери, Дж/мм²: $П_1 = П_{тр}$ — в трансформаторе; $П_2 = П_{пер}$ — при энергопередаче; $П_3 + П_4 = П_и$ — в изделии	$П_{тр} = \varepsilon_{пит} - \varepsilon_{св}$ $П_{пер} = \varepsilon_{св} - \varepsilon_и$ $П_и = \varepsilon_и - \varepsilon_{ст}$
Удельная энергия, Дж/мм²; $\varepsilon_р$ — резки; $\varepsilon_в$ — выплавления	$\varepsilon_р$ соответствует $\varepsilon_{св}$ $\varepsilon_в$ соответствует $\varepsilon_{ст}$
II. Экономические показатели	
Удельное время процесса, ч/мм²	$\tau = \Sigma t/S$
Удельная трудоемкость, нормо-час/мм²	$T_р = \frac{\Sigma_{нормозатрат}}{S}$
Удельная стоимость, руб/мм² и расход материалов, кг/мм²	$C_м = \frac{\Sigma_{затрат}}{S}$ $P_м = \frac{\Sigma_{материалов}}{S}$
III. Полная эффективность процесса (с учетом качества или надежности получаемых соединений)	
Эффективность с учетом качества, Дж/мм², где Q — относительный показатель качества	$Э_к = \varepsilon/Q$
Эффективность с учетом надежности, Дж/(мм² · ч)	$Э_н = \varepsilon/P(t)$ или $Э_н = \frac{\varepsilon}{T_{ср}}$
«Наработка» на джоуль, мм²/Дж	$\frac{Q}{\varepsilon}$; $\frac{P(t)}{\varepsilon}$; $\frac{T_{ср}}{\varepsilon}$

типа 18-8 показал (рис. 7), что с увеличением толщины изделия удельная сварочная энергия резко возрастает при использовании многопроходной сварки. Например, аргонодуговая сварка W-электродом (АДВ) обеспечивает сварку стыкового соединения листов толщиной 15 мм при общих затратах на все проходы до 1000 Дж/мм². Электронно-лучевой процесс (ЭЛС) благодаря кинжальному проплавлению и однопроходной сварке позволяет сварить встык металл толщиной 10—50 мм практически при одной и той же удельной энергии 30—60 Дж/мм². Использование плазменной дуги (ПД) и дуги в вакууме (ВД) при узкой разделке также позволяет потреблять при сварке меньше энергии ($\varepsilon_{св}$ = = 150 ÷ 300 Дж/мм²), чем для дуги под флюсом (ДФ), которая в зависимости от разделки кромок требует $\varepsilon_{св}$ = 400 ÷ 800 Дж/мм².

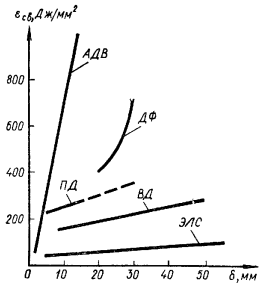


Рис. 7. Средние значения удельной энергии ε, Дж/мм², необходимой при сварке стали 18-8 $\delta \leqslant 40$ мм разными методами

Сравнение критериев $\varepsilon_и$ и ε_0 показывает, что ε с уменьшением интенсивности источника возрастает примерно от единиц (3—5 Дж/мм²) для лазерной сварки до сотен (200—400 Дж/мм²) для газового пламени (рис. 8).

Плазменная дуга при достаточных мощностях разрезает коррозионно-стойкую сталь при удельной энергии резки $\varepsilon_р$ = 100 Дж/мм². Однако при толщинах свыше 100—120 мм мощности источника не хватает для интенсивного ведения процесса, и $\varepsilon_р$ возрастает до 300—350 Дж/мм².

Критерий $\varepsilon_р$ вычисляется так же, как и $\varepsilon_{св}$, а удельная энергия выплавления $\varepsilon_в = \varepsilon_р\eta_в$, где $\eta_в$ — энергетический коэффициент выплавления, составляющий

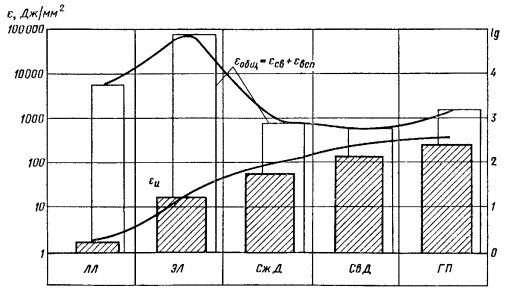


Рис. 8. Порядок величин удельной энергии $\varepsilon_и$ и $\varepsilon_{общ}$, Дж/мм², необходимой для однопроходной сварки стали различными методами. $\varepsilon_{всп}$ для ЭЛС подсчитано с учетом вакуумирования камеры и сварки соединения сечением около 1000 мм². Обозначения см. подпись под рис. 6; ЛЛ — лазерный луч

при оптимальных режимах резки металла толщиной 10—100 мм: для стали 18-8 ~ 55%, а для сплава АМг6 ~ 25%.

Оценка энергоемкости сварочных процессов не всегда встречает на практике нужное понимание. Иногда указывают на низкую стоимость электроэнергии и на сравнительно малую ее долю в общих затратах на сварку. Однако такой взгляд неверен. Необходимо иметь в виду, что только на плавление электродного металла по всей стране расходуется в год более $2 \cdot 10^8$ кВт·ч электроэнергии, а если учесть затраты энергии на контактную, диффузионную, электронно-лучевую и другие способы сварки и резки, то общий расход электроэнергии на сварку составит по стране более 10^9 кВт·ч в год. Сокращение этих расходов только на 10% даст экономию $\sim 1 \cdot 10^8$ кВт·ч в год.

Сравнение эффективности Т-, ТП- и ПМ-процессов сварки показывает, что для многих видов соединений и материалов механические и термомеханические процессы сварки требуют значительно меньше энергии, чем сварка плавлением. Например, для сварки встык стальных стержней диаметром 20 мм при дуговом ванном способе необходимо $\varepsilon_{св} = 1800$ Дж/мм^2,

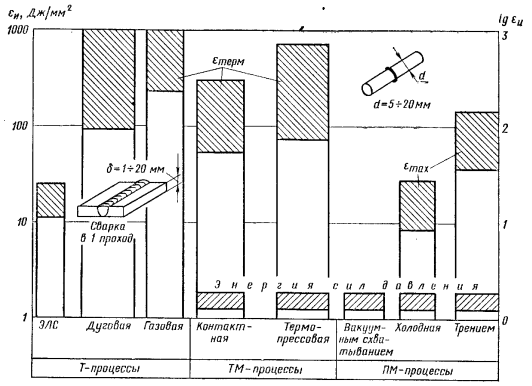


Рис. 9. Удельная энергия $\varepsilon_и$, требуемая для выполнения однотипных стыковых соединений с применением разных процессов

при контактной стыковой сварке оплавлением $\sim$400 Дж/мм^2, при сварке трением $\sim$130 Дж/мм^2. Для сварки встык пластин из алюминиевого сплава толщиной 5 мм требуется: при аргонодуговой сварке $\varepsilon_{св} = 300$ Дж/мм^2, при контактной сварке $\sim$200 Дж/мм^2, при холодной сварке $\sim$30 Дж/мм^2.

Анализ эффективности по различным классам сварочных процессов позволяет построить условную диаграмму удельной энергии, необходимой для сварки соединений определенного типа с применением разных процессов или источников энергии. На диаграмме (рис. 9) по вертикальной оси в логарифмическом масштабе отложены приблизительные значения $\varepsilon_и$, а по горизонтальной оси указаны возможные процессы применительно к сварке встык стальных листов толщиной до 20 мм или стержней диаметром до 20 мм.

Судить об эффективности процесса сварки следует с учетом используемого оборудования. Например, контактную точечную сварку пересекающихся стержней можно вести на машине МТП-75. При этом для стержней ⌀ 6 + 6 мм затраты $\varepsilon_{св} \approx 500$ Дж/мм^2, что в 10 раз больше, чем $\varepsilon_{св}$ для соединения стержней ⌀ 3 + 3. Такой рост $\varepsilon_{св}$ связан с высокими потерями из-за индуктивного сопротивления во вторичном контуре машины. Сварка тех же стержней выпрямленным током

позволила ограничить затраты $\varepsilon_{св} = 50 \div 100$ Дж/мм^2. На этом примере целесообразно показать также изменение термодинамического КПД. Минимально необходимую энергию $\varepsilon_{ст}$, требуемую для соединения стержней, определим исходя из энергосодержания ΔH зоны сварки. Принимаем объем V нагретого металла равным объему двух цилиндров длиной каждый по одному диаметру. Средняя температура нагрева $T \approx 1000°$ С, удельная объемная теплоемкость для стали $c\gamma = 1{,}2$ кал/(см^3·°С). Тогда $\Delta H = Vc\gamma\Delta T = 2\frac{\pi d^2}{4} 0{,}5dc\gamma 1000 = 0{,}1 \cdot 1000 =$ $= 120$ кал ≈ 500 Дж; $\varepsilon_{ст} = \Delta H/S = \frac{500}{12} \approx 40$ Дж/мм^2. Из опыта значение $\varepsilon_{св} =$ $= 50$ Дж/мм^2. Тогда

$$\eta_{тд} = \varepsilon_{ст}/\varepsilon_{св} = \frac{40}{50} = 0{,}8;$$

в то же время для сварки стержней ⌀ 6 + 6 на МТП-75 получаем $\eta_{тд} \sim 0{,}1$.

Следует отметить, что величины удельных энергий ε, Дж/м^2 показывают не только удельную энергоемкость процесса сварки единицы площади стыка. Например, $\varepsilon_и$ характеризует также количество переплавленного или разогретого материала на единицу площади шва, а следовательно, величину активной зоны сварного соединения, в которой произошли существенные изменения в состоянии материала, деформацию соединения и т. д. Такие сведения весьма важны, поэтому целесообразно в ряде случаев применять показатель удельной энергии $\varepsilon = \frac{q}{v\delta}$ (Дж/м^2 как более информативный, чем показатель погонной энергии q/v, измеряемый Дж/м). Использование при анализе разных методов сварки показателей удельной энергии ε Дж/м^2 стимулирует выбор перспективных в отношении энергоемкости процессов и источников энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бэр Г. Д.** Техническая термодинамика. Пер. с нем. М., „Мир", 1977. 360 с.
2. **Волченко В. Н.** О классификации процессов сварки.—„Автоматическая сварка". 1970, № 10.
3. **Волченко В. Н.** Источники энергии сварочных процессов. М., „Машиностроение", 1971. 76 с.
4. **Китайгородский А. И.** Введение в физику. М., „Физматгиз", 1959. 560 с.
5. **Теоретические основы сварки.** Под ред. В. В. Фролова. Учебное пособие для вузов. М., „Высшая школа", 1970. 592 с. Авт.: В. В. Фролов, В. А. Винокуров, В. Н. Волченко.

Глава 2

РАСЧЕТЫ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ

Сварочные процессы в металле в большинстве случаев протекают при быстром изменении температуры в пределах от температуры окружающего воздуха до температуры испарения металла. В этом весьма широком температурном промежутке развиваются разнообразные физические и химические процессы — плавление основного и присадочного металлов, металлургические реакции в жидкой ванне, кристаллизация расплавленного металла, структурные и объемные изменения в металле шва и основном металле, процессы местного пластического деформирования. Для управления сварочными процессами необходимо знать, как влияют на них все определяющие параметры, в том числе изменение температуры металла во времени.

Процессы нагревания и охлаждения металла при сварке и местной термической обработке определяются воздействием высококонцентрированных источников теплоты и условиями отвода теплоты от областей действия источников. Электрическая дуга, плазменная струя, газовое пламя, электронный луч, сфокусированное световое излучение, луч лазера, электрический ток, вводимый через контактный участок поверхности изделия, и трение на контактном участке являются местными источниками; выделяемая ими теплота весьма неравномерно распределена по поверхности или объему металла. Источники теплоты, применяемые для сварки, характеризуются эффективной тепловой мощностью, распределением выделяемой теплоты по поверхности или объему изделия и изменением этого распределения во времени.

НАГРЕВ МЕТАЛЛА СВАРОЧНОЙ ДУГОЙ

Тепловые характеристики сварочной дуги. Полную тепловую мощность дуги приближенно считают равной тепловому эквиваленту ее электрической мощности (0,24 UI, кал/с, где U — падение напряжения на дуге, В; I — сила тока, А).

Эффективная тепловая мощность дуги q есть количество теплоты, введенное за единицу времени в металл изделия и затраченное на его нагрев,

$$q = 0{,}24\eta_и UI; \qquad (1)$$

здесь $\eta_и$ — эффективный КПД процесса нагрева, представляющий отношение количества теплоты, введенное дугой в изделие, к тепловому эквиваленту электрической мощности дуги. Он характеризует эффективность процесса выделения теплоты и теплообмена в дуговом промежутке и зависит от технологических условий сварки.

Экспериментальные данные показывают, что $\eta_и$ изменяется в следующих пределах: 0,70—0,85 — при сварке открытой дугой металлическими электродами; 0,90—0,99 — при сварке под флюсом; 0,50—0,75 при сварке угольными электродами в диапазоне мощностей 300—12 000 кал/с. Он уменьшается с удлинением дуги и возрастает с углублением дуги в ванну. При металлических электродах $\eta_и$ в малой степени зависит от полярности и величины сварочного тока.

Тепловой поток сварочной дуги наиболее интенсивен в центральной части пятна нагрева, где происходит выделение теплоты в поверхностных слоях металла

вследствие электронной и ионной бомбардировки. В области, прилегающей к электрически активному пятну нагрева, металл нагревается преимущественно за счет лучистого теплообмена со столбом дуги и конвективного теплообмена с горячими газами факела дуги. По мере удаления от центра пятна

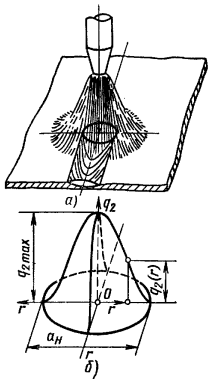


Рис. 1. Схема сварочной дуги как источника теплоты:

а — столб и пламя дуги; *б* — схема распределения теплового потока дуги (нормально-круговой источник)

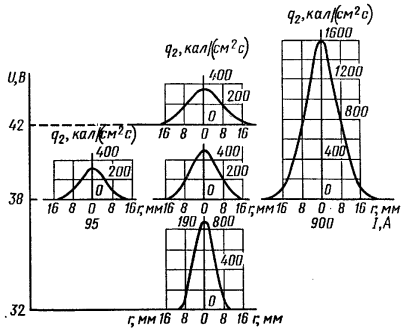


Рис. 2. Влияние тока и напряжения открытой угольной дуги на распределение удельного теплового потока q_2 [кал/(см² · с)] по пятну нагрева

интенсивность теплового потока убывает. Распределение удельного теплового потока q_2 (кал/см²·с) по радиусу пятна нагрева приближенно описывают нормальным законом распределения вероятности Гаусса (рис. 1):

$$q_2(r) = q_{2max} e^{-kr^2}, \qquad (2)$$

где q_{2max} — наибольший удельный тепловой поток в центре пятна нагрева; k — коэффициент сосредоточенности удельного потока дуги, см$^{-2}$; r — расстояние от оси источника, см.

С повышением тока при постоянном напряжении дуги q_{2max} увеличивается. С повышением напряжения, т. е. с удлинением дуги, при неизменном токе q_{2max} уменьшается и распределение удельного теплового потока становится менее сосредоточенным (рис. 2). Тепловой поток электрической дуги под флюсом значительно более сосредоточен, чем тепловой поток открытой угольной или металлической дуги (рис. 3).

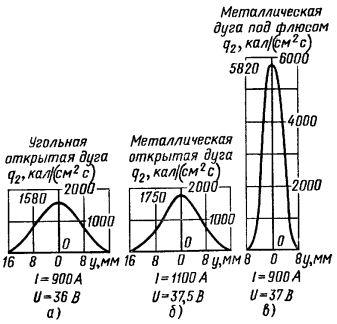


Рис. 3. Распределение удельного теплового потока q_2 [кал/(см²·с)] по пятну нагрева:

а — открытой угольной дуги; *б* — открытой металлической дуги; *в* — металлической дуги под флюсом

Процессы распространения теплоты. Теплота местного источника, сосредоточенного на небольшом участке поверхности или в малом объеме изделия, сравнительно быстро нагревает металл до высокой температуры. Вследствие теплопроводности металла и теплообмена на поверхности теплота отводится от области приложения источника; местный нагрев до заданной температуры замедляется и снижается его эффективность.

Располагая характеристиками источников теплоты, можно рассчитать процесс распространения ее в металле. Из принципа местного влияния теории теплопроводности следует, что характер распределения теплоты местного источника оказывает существенное влияние на температурное поле только в области, близкой к источнику. Поэтому температурные поля в изделии в области, удаленной от дуги, можно описывать с достаточной точностью, схематизируя характер распределения теплового потока дуги. Наиболее просто считать, что теплота источника сосредоточена в элементарном объеме: в точке, по отрезку прямой или по участку плоскости в соответствии с формой теплопроводящего тела. При более точных расчетах температуры в области, близкой к дуге, следует учитывать распределение потока дуги, описываемое нормальным законом (2).

Коэффициенты теплофизических свойств металла изделия, осредненные в расчетном интервале температур, обозначены: λ — коэффициент теплопроводности, кал/(см·с·°С); $c\gamma$ — объемная теплоемкость, кал/(см³·°С); $a=\frac{\lambda}{c\gamma}$ — коэффициент температуропроводности, см²/с.

Поверхностный теплообмен изделия с окружающим воздухом характеризуется коэффициентом теплообмена α, кал/(см²·с·°С).

Процесс распространения теплоты при сварке можно разделить на три стадии:

теплонасыщение, когда температуры в поле, перемещающемся вместе с источником теплоты, продолжают нарастать;

предельное квазистационарное состояние, когда подвижное поле практически устанавливается;

выравнивание температуры по окончании сварки.

Наплавка дугой валика на массивное изделие описывается схемой точечного источника теплоты q, кал/с постоянной мощности, равномерно и прямолинейно перемещающегося по поверхности полубесконечного тела со скоростью v, см/с (рис. 4). Температура предельного состояния процесса, отнесенная к подвижным координатам XYZ, связанным с источником O, выражается соотношением

$$T(R,\ x)=\frac{q}{2\pi\lambda R}\exp\left[-\frac{v}{2a}(x+R)\right], \qquad (3)$$

где $R^2=x^2+y^2+z^2$.

Изотермические поверхности вращения вокруг оси перемещения значительно сгущены впереди источника и разрежены в области, пройденной источником. С приближением к точечному источнику расчетная температура неограниченно возрастает.

Дуговая сварка листов встык (однопроходная) описывается схемой перемещения линейного источника теплоты по бесконечной пластине с теплоотдачей на поверхности и с полным выравниванием температуры по толщине δ, см. Температура предельного состояния процесса, отнесенная к подвижным координатам, выражается соотношением

$$T(r,\ x)=\frac{q}{2\pi\lambda\delta}\exp\left(-\frac{vx}{2a}\right)K_0\left(\nu\frac{vr}{2a}\right), \qquad (4)$$

где $\nu^2=1+\frac{8\lambda\alpha}{(vc\gamma)^2\delta}$ — критерий влияния теплоотдачи; $r^2=x^2+y^2$; $K_0(u)$ — функция Бесселя от мнимого аргумента второго рода нулевого порядка.

Теплота в листе менее сконцентрирована у дуги по сравнению с теплотой в массивном теле (рис. 5).

Температуру $T(t)$ данной точки подвижного поля *в процессе теплонасыщения* можно представить как произведение температуры $T(\infty)$ той же точки

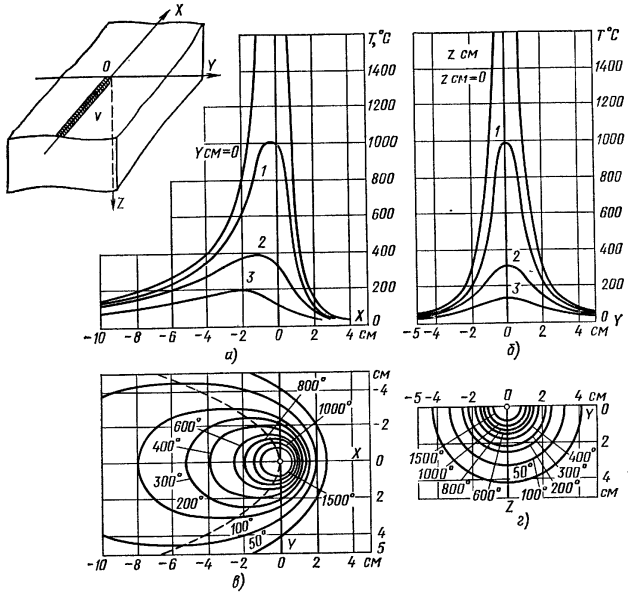


Рис. 4. Пространственное температурное поле предельного состояния при дуговой наплавке валика на массивное стальное изделие: $q=1000$ кал/с; $v=0{,}1$ см/с. Сплошные линии — изотермы; штриховая линия — кривая максимальных температур:

а — распределение температуры на поверхности XOY по прямым, параллельным оси OX; *б* — распределение температуры в плоскости YOX; *в* и *г* — изотермы в плоскостях XOY и YOZ

в предельном состоянии на коэффициент теплонасыщения $\psi(t)$, зависящий от времени (рис. 6):

$$T(t)=\psi(t)\,T(\infty). \qquad (5)$$

Процесс выравнивания температуры после прекращения в момент t_0 действия источника теплоты постоянной мощности q получается наложением двух процессов: процесса теплонасыщения $T(t)$ продолжающего действовать источника и процесса теплонасыщения $T(t-t_0)$ равного ему стока теплоты q, начавшего действовать в момент t_0, когда действие реального источника прекратилось:

$$T(t)\,|_{t>t_0}=T(t)-T(t-t_0). \qquad (6)$$

Быстродвижущиеся источники. Температура предельного состояния при действии *мощных дуг, движущихся с большой скоростью* (например, при автоматической сварке под флюсом и в газах), выражается упрощенными формулами:

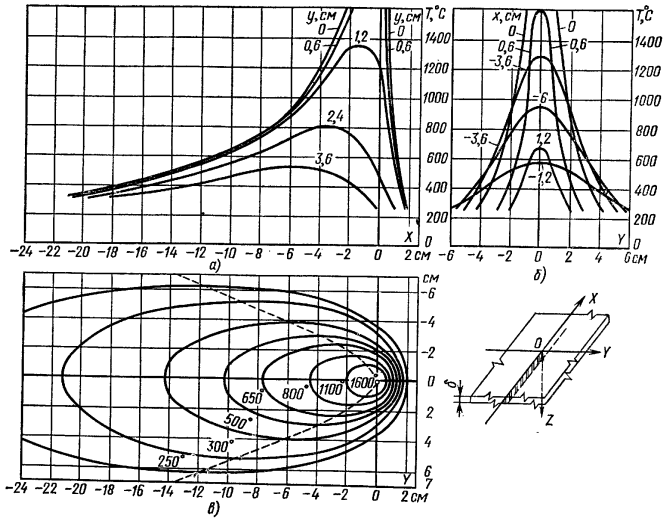


Рис. 5. Плоское температурное поле предельного состояния при дуговой сварке встык стальных листов толщиной 10 мм; $q = 1000$ кал/с; $v = 0{,}1$ см/с; $\alpha = 0{,}0014$ кал/(см²·с·°С). Сплошные линии — изотермы; штриховая линия — кривая максимальных температур:

а — распределение температуры на поверхности XOY по прямым, параллельным оси OX; *б* — распределение температуры на поверхности XOY по прямым, параллельным оси OY; *в* — изотермы в плоскости XOY

при наплавке валика на массивное изделие

$$T(t, y_0, z_0) = \frac{q}{2\pi\lambda v t} \exp\left(-\frac{y_0^2 + z_0^2}{4at}\right); \qquad (7)$$

при стыковой сварке листов

$$T(t, y_0) = \frac{q}{v\delta\sqrt{4\pi\lambda c\gamma t}} \exp\left(-\frac{2at}{c\gamma\delta} - \frac{y_0^2}{4at}\right); \qquad (8)$$

здесь $t = -\frac{x}{v}$ — время, прошедшее после пересечения дугой плоскости Y_0OZ_0, в которой расположена рассматриваемая точка поля A (рис. 7). Эти выражения относятся к неподвижным прямоугольным координатам $X_0Y_0Z_0$.

Теплота, введенная мощным источником, быстродвижущимся по оси OX, распространяется преимущественно по направлениям, перпендикулярным к этой оси (рис. 7, *а*).

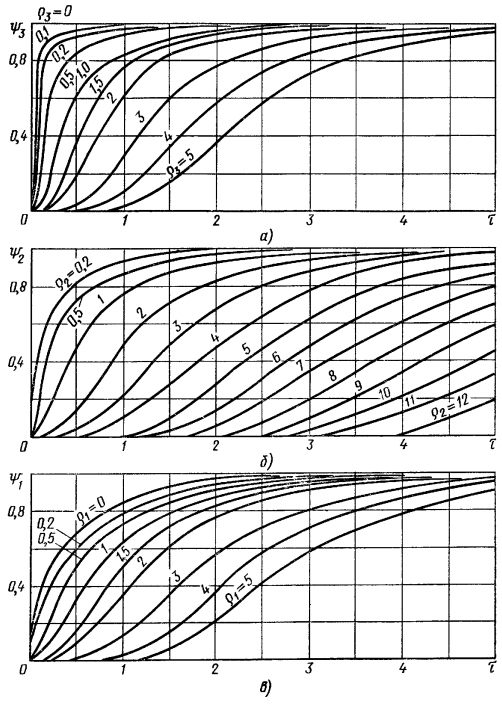


Рис. 6. Коэффициент теплонасыщения в зависимости от времени:

а — для точечного источника в полубесконечном теле; *б* — для линейного источника в пластине с теплоотдачей $\left(\rho_2 = \nu\frac{vr}{2a};\ \tau = \nu^2\frac{v^2t}{4a}\right)$; *в* — для плоского источника в стержне с теплоотдачей $\left(\rho_1 = \nu\frac{v|x|}{2a};\ \tau = \nu^2\frac{v^2t}{4a}\right)$

В области, прилегающей позади дуги к шву или валику, выражения (7) и (8) для быстродвижущихся источников описывают также с достаточной точностью и процесс распространения теплоты дуги, перемещающейся с произвольной ко-

нечной скоростью. Лишь в области впереди штриховой кривой на рис. 7, *в* ошибка при расчете температуры по выражению (7) не превышает 1%.

Максимальные температуры. В процессе распространения по металлу теплоты сварочной дуги температура отдельных точек повышается, достигает максимума T_{max} и затем падает, стремясь к средней температуре изделия.

В точках изделия, удаленных от сварного шва или валика, скорости нагрева (охлаждения) и максимальные температуры тем ниже, а момент достижения максимума температуры наступает тем позже, чем дальше расположена рассматриваемая точка от оси перемещения источника теплоты.

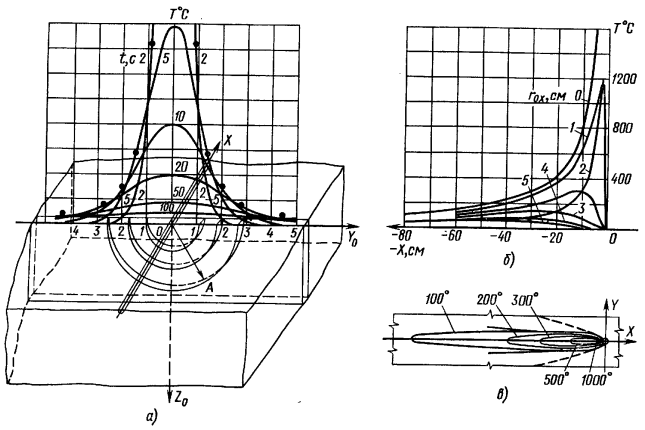


Рис. 7. Процесс распространения теплоты мощной быстродвижущейся дуги в массивном стальном изделии; $q = 5000$ кал/с; $v = 1$ см/с; *а* — изохроны температуры по оси OY_0; *б* — распределение температуры по осям, параллельным оси перемещения источника; *в* — изотермы на поверхности изделия

Максимальная температура точки массивного изделия в процессе распространения теплоты при наплавке валика мощной быстродвижущейся сварочной дугой

$$T_{max}(r_0) = \frac{1}{e}\frac{q}{vc\gamma\frac{\pi}{2}r_0^2} \qquad (9)$$

обратно пропорциональна квадрату расстояния r_0 от оси перемещения точечного источника.

Максимальная температура точки тонкой пластины при сварке встык мощной быстродвижущейся дугой на малых расстояниях $y_0 \ll \sqrt{\frac{\lambda\delta}{\alpha}}$ от оси шва

$$T_{max}(y_0) = \frac{0{,}484q}{vc\gamma\delta 2y_0}\left(1-\frac{\alpha y_0^2}{\lambda\delta}\right) \qquad (10)$$

при отсутствии теплоотдачи ($\alpha = 0$) обратно пропорциональна расстоянию y_0 от плоскости перемещения линейного источника. В массивном теле и в пластине

максимальные температуры T_{max} пропорциональны погонной энергии q/v мощного быстродвижущегося источника, т. е. количеству теплоты, вводимому дугой в изделие, на единицу длины шва или валика.

Влияние ограниченности размеров изделия по толщине, ширине или длине на распространения теплоты сварочной дуги учитывают по методу отражений, предполагая, что ограничивающие поверхности не пропускают теплоты [6, 7].

Решение более сложных задач нагрева мощными источниками может быть найдено, например, с помощью интегральных преобразований в конечных и бесконечных пределах [5]. Методы решения задач нагревания металлов с учетом температурной зависимости теплофизических свойств рассмотрены в монографии [3].

НАГРЕВ МЕТАЛЛА ПЛАЗМЕННОЙ ДУГОЙ

Тепловые характеристики плазменной дуги. В дуге, обжатой водоохлаждаемым соплом и потоком газа, так называемой плазменной дуге, температура выше, чем в свободно горящей при одинаковом токе. Скорость газового потока при наличии обжимающих дугу стенок и одинаковом расходе газа также возрастает по сравнению со свободно горящей дугой. Дуга в этих условиях стабилизируется, т. е. затрудняются случайные колебания дуги.

Энергия плазменной дуги передается нагреваемому телу электронами и тяжелыми частицами, а также вынужденными конвективными потоками и излучением столба дуги. Эффективный КПД плазменно-дугового нагрева $\eta_и$ может достигать высоких значений (табл. 1).

1. Эффективный КПД плазменно-дугового нагрева

Нагреваемый материал	$\eta_и$	Режим
Массивное тело	0,30—0,75	Аргон; $I = 200$ А; расход газа 0,1—5 г/с
Проволока	0,10	Аргон; $I = 190$ А; расход газа 1,5 г/с
Порошок	0,20	Аргон; $I = 250 \div 350$ А
Газ:		
аргон	0,10—0,70	$I = 250$ А; расход газа 0,2 г/с
водород	0,30—0,80	$I = 220$ А; расход газа 0,3 г/с

Эффективный КПД плазменно-дугового нагрева ниже, чем КПД дуги, что объясняется большей теплоотдачей мощности стенкам сопла и окружающему пространству. Эффективная мощность q для плазменной дуги длиной 100 мм почти линейно увеличивается с повышением тока и зависит от состава и расхода газа, а также от длины дуги.

Изменение удельного теплового потока $q_2(r)$ по радиусу пятна нагрева для плазменной дуги приближенно описывается законом Гаусса (2).

Тепловые характеристики плазменной струи. При обработке плазменной струей материал подвергается действию высокотемпературного газового потока, оставаясь электрически нейтральным. Энергия плазменной струи передается нагреваемому телу в результате процессов теплообмена — вынужденной конвекции и излучения струи. Эффективный КПД нагрева плазменной струей несколько ниже, чем при нагреве плазменной дугой (табл. 2).

Эффективная мощность плазменной струи с повышением скорости плазмообразующего газа сначала увеличивается, а затем несколько снижается (рис. 8) из-за снижения температуры газа. Увеличение расстояния от среза сопла до нагреваемого тела приводит к снижению эффективной мощности q, но характер снижения q зависит от расхода газа (рис. 9).

Как и в случае плазменной дуги, повышение тока приводит к почти линейному увеличению q.

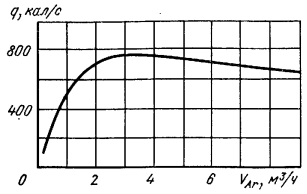


Рис. 8. Зависимость эффективной мощности плазменной струи от скорости плазмообразующего газа (аргон; $I = 200$ А; углубление дуги в канал $l = 30$ мм; диаметр канала сопла 8 мм; расстояние от сопла до изделия 5 мм)

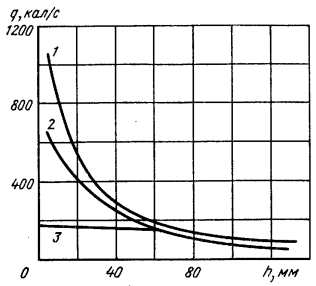


Рис. 9. Изменение эффективной тепловой мощности плазменной струи от расстояния между соплом и нагреваемым током для различных скоростей потока аргона:

1) $v_{Ar} = 4{,}3$ м³/ч; *2)* $v_{Ar} = 1{,}2$ м³/ч; *3)* $v_{Ar} = 0{,}25$ м³/ч; ($I = 200$ А; $l = 30$ мм; диаметр канала 8 мм)

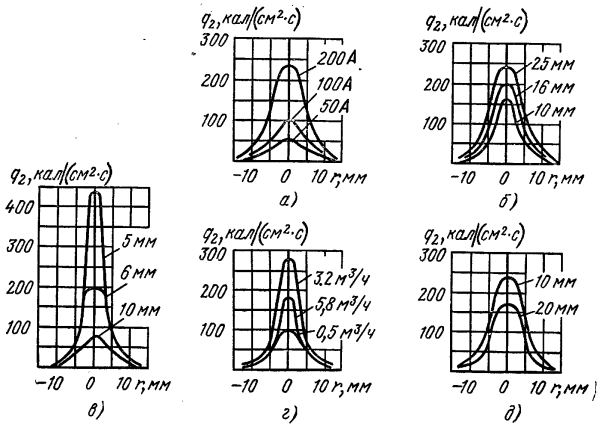


Рис. 10. Распределение теплового потока q_2 [кал/(см²·с)] по пятну нагрева плазменной струи в зависимости от:

а — тока дуги (расход аргона 0,5 м³/ч; углубление дуги в канал 25 мм; диаметр канала сопла 8 мм; расстояние сопла от изделия 10 мм); *б* — углубления дуги в канал ($I = 200$ А); *в* — диаметра канала ($I = 100$ А); *г* — расхода аргона ($I = 100$ А); *д* — расстояния между соплом и изделием ($I = 200$ А)

2. Эффективный КПД нагрева плазменной струей

Нагреваемый материал	$\eta_и$	Режим
Массивное тело	0,10—0,50	Аргон; $I = 300$ А; расход газа 0,1—5 г/с
Проволока	0,20—0,30	Аргон; $I = 330$ А; расход газа 0,1—5 г/с
Порошок: во встречных струях	0,07	Аргон; $I = 300$ А; расход газа 1,4 г/с
в струе с магнитной крутилкой	0,04	Аммиак; $I = 225$ А; расход газа 1,5 г/с

Распределение удельного теплового потока $q_2(r)$ по пятну нагрева плазменной струи описывается законом нормального распределения (2). На рис. 10 представлены данные по распределению $q_2(r)$ по пятну нагрева в зависимости от ряда параметров. Схемы нагрева металлов плазменной струей аналогичны рассматриваемым ниже схемам нагрева газовым пламенем.

НАГРЕВ МЕТАЛЛА ГАЗОВЫМ ПЛАМЕНЕМ

Тепловые характеристики газового пламени (температура; эффективная тепловая мощность q, кал/с; распределение теплового потока пламени q_2, кал/(см²·с), по пятну нагрева) зависят от теплотворной способности горючего газа, чистоты кислорода и их соотношения в газовой смеси.

Температура газового пламени (°С) неодинакова в различных его частях и достигает наибольшего значения на оси пламени вблизи конца ядра:

Ацетилен	3100—3150
Метан	2100—2200
Пропано-бутановая смесь	2400—2500
Коксовый газ	2000—2100
Водород	2000—2100

Газовое пламя нагревает поверхность металла вследствие процессов теплообмена — вынужденной конвекции и излучения, интенсивность которых возрастает с увеличением перепада температур пламени и поверхности нагреваемого металла. Поэтому эффективная мощность пламени возрастает с повышением его температуры и падает с повышением температуры поверхности металла.

Эффективная мощность пламени q (ее предельное значение, соответствующее установившемуся состоянию процесса при нагреве металла перемещающимся пламенем) возрастает с увеличением расхода $V_{C_2H_2}$, л/ч газа (рис. 11). Эффективный КПД $\eta_и$ процесса нагрева металла газовым пламенем представляет отношение эффективной мощности пламени q к полной тепловой мощности пламени $q_н$, соответствующей низшей теплотворной способности ацетилена 14 600 кал/ч (при 20° С и 760 мм рт. ст.)

$$\eta_и = \frac{q}{3{,}5V_{C_2H_2}}. \qquad (11)$$

Параметры режима нагрева, размеры изделия и теплофизические свойства металла также влияют на эффективную мощность, хотя и в меньшей степени, чем расход газа. При правом нагреве эффективная мощность пламени выше, чем при левом (рис. 12). С увеличением скорости перемещения пламени его эффективная мощность несколько возрастает. С увеличением толщины нагреваемого металла, а также его температуропроводности эффективная мощность пламени возрастает.

Наибольшая эффективная мощность пламени соответствует определенным соотношениям кислорода и горючего газа, несколько меньшим, чем теоретические

соотношения по реакции полного сгорания: 2,3 — для ацетилена; 2,0 — для метана; 0,8 — для коксового газа; 0,4 — для водорода; 3,5 — для пропано-бутановой смеси.

С увеличением средней скорости истечения горючей смеси интенсивность теплообмена и эффективная мощность пламени увеличиваются.

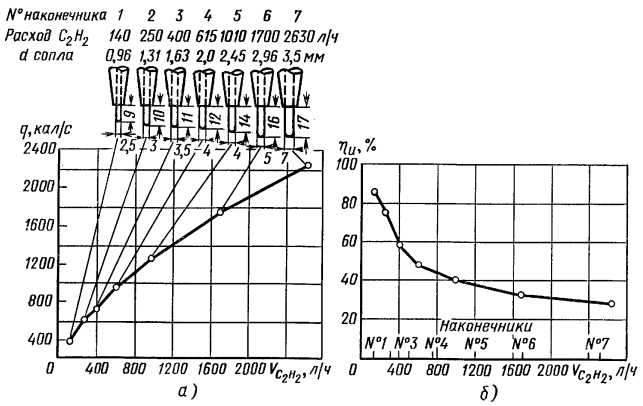


Рис. 11. Эффективная мощность пламени, длина ядра (*а*) и эффективный КПД (*б*) процесса нагрева металла в зависимости от расхода ацетилена (номера наконечника простой горелки)

Распределение удельного теплового потока q_2 пламени простой горелки по радиусу r пятна нагрева приблизительно описывают соотношением (2) (рис. 13).

Для расчетов удобно характеризовать распределение теплового потока постоянной времени $t_0 = {}^1/_4 ak$. Коэффициенты сосредоточенности k пламени простых горелок убывают, а постоянные времени t_0 возрастают с увеличением номера наконечника и расхода ацетилена (табл. 3).

Газовое пламя нагревает металл значительно медленнее и плавнее, чем сварочная дуга, так как наибольший тепловой поток на оси ацетилено-кислородного пламени простой горелки в 8—12 раз меньше открытой сварочной дуги примерно одинаковой эффективной мощности.

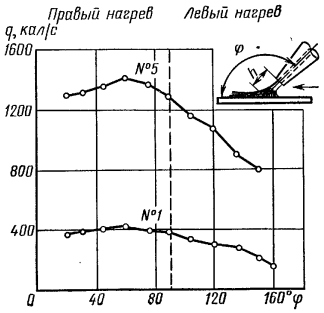


Рис. 12. Эффективная мощность пламени простой горелки в зависимости от угла наклона φ оси пламени к поверхности металла для наконечников № 1 и 5

3. Тепловые характеристики сварочного ацетилено-кислородного пламени простой горелки

Тепловые характеристики	Номера наконечников горелки						
	1	2	3	4	5	6	7
Диаметр сопла мундштука, мм	1,0	1,3	1,6	2,0	2,5	3,0	3,5
Расход ацетилена V_A, л/ч	150	250	400	600	1000	1700	2600
Длина ядра пламени h, мм	9	10	11	12	14	16	17
Эффективная мощность пламени q, кал/с	380	600	720	920	1270	1750	2250
Эффективный КПД при нагревании стали $\eta_и$	0,72	0,68	0,51	0,44	0,36	0,30	0,25
Коэффициент сосредоточенности удельного теплового потока k, см$^{-2}$	0,39	0,35	0,31	0,28	0,23	0,20	0,17
Наибольший удельный тепловой поток $q_{2\,max}$, кал/(см^2·с)	47	67	72	82	93	111	122
Постоянная времени при нагревании стали t, с	8	9	10	11	14	15	19

Сложные горелки, многопламенные и щелевые, позволяют регулировать форму и размеры пламени и распределять тепловой поток заданным образом по участкам поверхности металла.

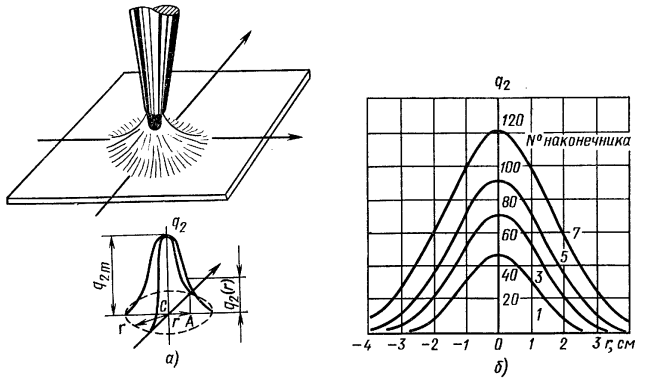


Рис. 13. Распределение удельного теплового потока q_2 пламени простой горелки по радиусу r пятна нагрева металла при угле наклона 90°:

а — схема; *б* — распределение при различных номерах наконечников (разный расход ацетилена)

Нагрев тонких металлических листов (с полным выравниванием температуры по толщине) плазменной струей и пламенем простой горелки (с осью, перпендикулярной к поверхности листа), неподвижным или перемещающимся прямолинейно с постоянной скоростью v, см/с, описывается схемой подвижного

нормально-кругового источника теплоты в тонкой пластине с теплоотдачей. Температурное поле в процессе теплонасыщения, отнесенное к подвижной схеме координат XOY с центром в фиктивном сосредоточенном источнике O, движущемся на расстоянии vt_0 впереди центра C истинного источника (рис. 14), выражается соотношением

$$T(x, y, t)=\frac{q}{2\pi\lambda\delta}\exp\left(-\frac{vx}{2a}+bt_0\right)K_0(\rho_2)\,[\psi_2(\rho_0, \tau+\tau_0)-\psi_2(\rho_2, \tau_0)], \qquad (12)$$

где $\rho_2=r\sqrt{\frac{v^2}{4a^2}+\frac{b}{a}}$; $\tau=\left(\frac{v^2}{4a}+b\right)t$; $\tau_0=\left(\frac{v^2}{4a}+b\right)t_0$ — безразмерные критерии расстояния и времени; коэффициент теплонасыщения определяется из графика

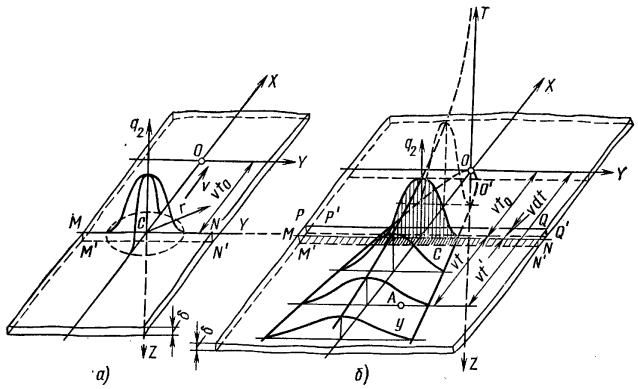


Рис. 14. Схема нагрева тонкой пластины:

а — поверхностным нормально-круговым источником теплоты; *б* — быстродвижущимся поверхностным нормально-полосовым источником теплоты

(см. рис. 7, *б*); $b=\frac{2\alpha}{c\gamma\delta}$; α, кал/(см²·с·°С) — коэффициент теплообмена, который выбирают как среднее из значений коэффициентов теплообмена между пламенем и верхней поверхностью листа [$\alpha_п = 0{,}01 \div 0{,}015$ кал/(см²·с·°С)] и между нижней поверхностью листа и спокойным воздухом [$\alpha_с = 0{,}001$ кал/(см²·с·°С)].

С приближением к предельному установившемуся состоянию процесса первое слагаемое в квадратных скобках стремится к единице.

По мере повышения скорости перемещения нормального источника температурное поле в листе приближается к полю быстродвижущегося нормально-полосового источника (рис. 14, *б*):

$$T(y, t)=\frac{q}{v\delta}\,[4\pi\lambda c\gamma\,(t+t_0)]^{-1/2}\exp\left[-\frac{y^2}{4a\,(t+t_0)}-bt\right]. \qquad (13)$$

Нагрев поверхности массивного тела (например, листа толщиной более 40 мм) плазменной струей или неподвижным пламенем простой горелки с осью,

перпендикулярной к нагреваемой поверхности, описывается схемой нормально-кругового источника теплоты на поверхности полубесконечного тела (рис. 15).

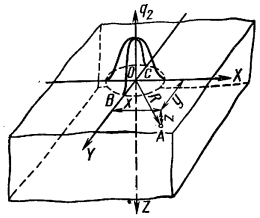


Рис. 15. Схема нагрева полубесконечного тела поверхностным нормально-круговым источником теплоты

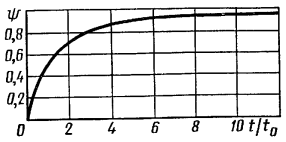


Рис. 16. Процесс нагрева поверхности полубесконечного тела непрерывнодействующим неподвижным нормально-круговым источником теплоты; ψ — коэффициент теплонасыщения центральной точки C (см. рис. 15)

Температура в центре источника C в процессе теплонасыщения, являющаяся максимальной температурой нагреваемого тела, выразится

$$T(t)=\frac{q}{2\lambda\sqrt{4\pi a t_0}}\,\frac{2}{\pi}\,\mathrm{arctg}\sqrt{\frac{t}{t_0}}. \qquad (14)$$

Первый сомножитель выражает максимальную температуру центральной точки при предельном состоянии процесса.

Второй сомножитель является коэффициентом теплонасыщения ψ (рис. 16), который стремится к единице в предельном состоянии процесса нагрева.

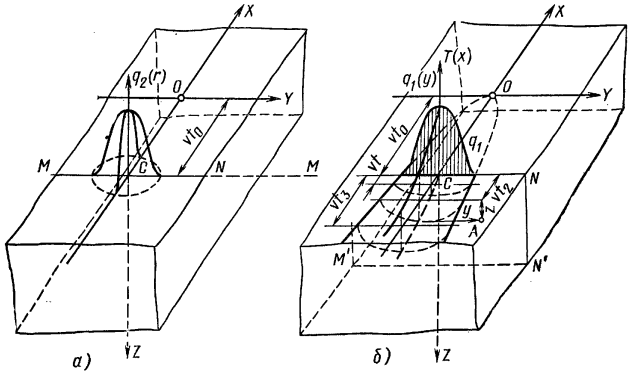


Рис. 17. Схема (*а*) нагрева поверхности полубесконечного тела мощным быстродвижущимся нормально-круговым источником q_2 (r) и эквивалентная ей схема (*б*) нагрева нормально-линейным источником q_1 (y)

Нагрев поверхности массивного тела плазменной струей или пламенем горелки при большой скорости перемещения описывается выражением температурного поля быстродвижущегося нормально-линейного источника (рис. 17):

$$T(y,\ z,\ t)=\frac{q}{2\pi\lambda\sqrt{t\,(t+t_0)}}\exp\left[-\frac{z^2}{4at}-\frac{y^2}{4a\,(t_0+t)}\right], \qquad (15)$$

где время t отсчитывают от момента, когда центр источника пересек рассматриваемую плоскость.

При нагреве поверхности массивного тела плазменной струей или пламенем простой горелки при прямолинейном перемещении с постоянной скоростью v

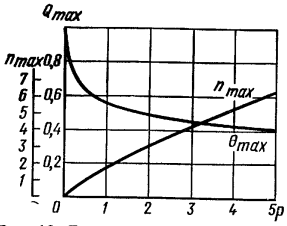


Рис. 18. График относительной максимальной температуры θ_{max} точек поверхности полубесконечного тела на оси перемещения нормально-кругового источника теплоты и коэффициента n_{max} для определения расстояния точек с максимальной температурой от центра источника в зависимости от критерия p

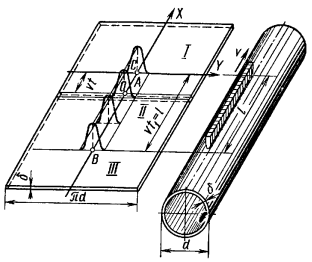


Рис. 19. Схема нагрева продольного шва трубы длиной l из тонкого листа пламенем быстродвижущейся линейной горелки

максимальная температура T_{max} предельного состояния в точке M на оси перемещения источника и расстояние f точки M от центра источника выражаются

$$T_{max}=\frac{q}{2\lambda\sqrt{4\pi at_0}}\theta_m; \qquad (16)$$

$$f=\sqrt{4at_0n_m}-vt_0.$$

Коэффициенты θ_m и n_m выбирают из графика (рис. 18) в зависимости от критерия скорости

$$p=\frac{vt_0^2}{4a}. \qquad (17)$$

Нагрев тонких металлических листов толщиной δ, см, пламенем линейной горелки (например, при газопрессовой сварке продольных швов труб) описывается схемой нормально-полосового источника длиной l, см, с линейной мощностью q_l, кал/см, и коэффициентом сосредоточенности k в направлении оси OY, быстро движущегося с постоянной скоростью v, см/с, в направлении оси OX (рис. 19) при коэффициенте теплообмена пламени с металлом $\alpha_п$.

Температура листа $T(t)$ в точках оси перемещения горелки под пламенем, т. е. в стадии нагрева $t < l/v$ (область II на рис 19), выражается

$$T(t)=\frac{q_l}{2\sqrt{\alpha_ц\lambda\delta}}\,b\left(\frac{t}{t_0};\ \tau_0\right). \qquad (18)$$

Относительную температуру θ выбирают по номограмме на рис. 20 в зависимости от относительной длительности нагрева t/t_0 и безразмерной постоянной $\tau_0=\frac{2\alpha t_0}{c\gamma\delta}$.

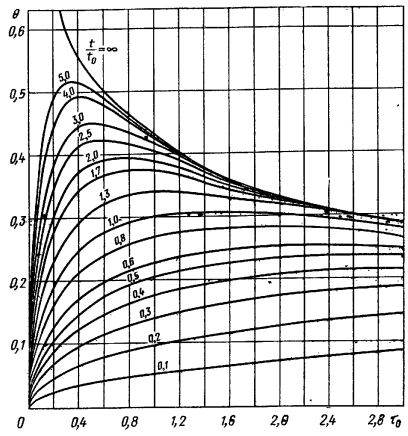


Рис. 20. Номограмма зависимости относительной температуры в точках на оси OX от критериев τ_0 и t/t_0 при нагреве тонкого листа пламенем быстродвижущейся линейной горелки

Температуру листа $T_1(t)$ в точках оси перемещения горелки позади пламени (см. рис. 19, область III), т. е. в стадии охлаждения $t > l/v$, вычисляют как разность температур по формуле (18) при разных значениях аргумента

$$T_1(t)=T(t)-T\left(t-\frac{l}{v}\right). \qquad (19)$$

Примеры расчета приведены в монографиях [1,2].

НАГРЕВ МЕТАЛЛА ПОТОКАМИ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ

Тепловые характеристики сфокусированного электронного луча. Явление термоэмиссии дает возможность создать в вакууме направленный поток электронов, кинетическая энергия которых при столкновении с твердым или жидким материалом превращается в тепло, выделяемое в материале.

В электронно-лучевых установках, используемых для сварки, ускоряющее напряжение изменяется в пределах от 10 до 150 кВ. Сила тока электронных пушек изменяется от нескольких десятков миллиампер до единиц ампер, а мощность электронно-лучевых установок составляет единицы и десятки киловатт.

Ускоренные электроны, сформированные электронно-оптической системой в пучок, попадая на поверхность твердого тела, проникают вглубь и выделяют энергию в некотором объеме, прилегающем к поверхности обрабатываемого изделия. Максимальная глубина проникновения электронов в твердое тело практически для всех обрабатываемых материалов не превышает десятых долей миллиметра при ускоряющих напряжениях до 150 кВ.

Потери энергии электронного луча связаны со вторичной эмиссией электронов, рентгеновским излучением, соударениями с молекулами газа в вакуумной камере потерями на аноде и с ионизацией паров металла.

При энергии первичных электронов до 200 кэВ только 0,1—1% подводимой энергии тратится на возбуждение рентгеновского излучения. Потери мощности на аноде обычно составляют 3—5%, энергетические потери, обусловленные соударением с молекулами остаточного газа в рабочей камере, 0,1%. На ионизацию паров металла при обработке электронным лучом расходуется несколько процентов мощности луча.

Основной источник энергетических потерь электронного луча связан со вторичной электронной эмиссией. Поэтому эффективный КПД $\eta_и$ электронно-лучевого нагрева, изменяющийся в пределах от 70 до 90%, практически не зависит от энергии первичных электронов; он зависит только от атомного номера обрабатываемого материала. Значения $\eta_и$ для ряда материалов приведены в табл. 4.

4. КПД электронно-лучевого нагрева для ряда металлов

Металл	Al	Ti	V	Fe	Ni	Cu	Zn	Nb	Mo	Ta	W
$\eta_и$	0,895	0,842	0,839	0,804	0,780	0,776	0,734	0,731	0,727	0,703	0,70

Эффективная мощность q, кал/с электронного луча определяется как количество тепла, введенное в единицу времени в металл изделия потоком электронов:

$$q = 0{,}24\eta_и UI.$$

Распределение плотности тока по сечению электронного луча, а также распределение плотности потока энергии по пятну нагрева может быть описано законом нормального распределения (рис. 21). Плотность потока энергии в электронно-лучевых сварочных установках может достигать 10^6 Вт/см^2 и выше.

Магнитные отклоняющие системы позволяют перемещать электронный луч в пространстве относительно изделия по заданному закону, например отклонять его в разные стороны относительно среднего пути перемещения с большой частотой (100 Гц и более), вращать по кругу или по другой замкнутой кривой и т. д.

При сварке тонколистовых конструкций целесообразен импульсный режим электронного луча. Модуляция частоты луча, так же как и длительности импульсов, осуществляется подачей на фокусирующий электрод отрицательных относительно катода импульсов напряжения.

Сварка тонколистовых конструкций электронным лучом, перемещающимся прямолинейно со скоростью v. Нагрев описывается схемой подвижного нормально-кругового источника в тонкой пластине с теплоотдачей по формуле (12). Если радиус пятна нагрева мал (велик коэффициент сосредоточенности), то может быть выбрана схема перемещения линейного источника теплоты с теплоотдачей на поверхности и полным выравниванием температуры по толщине δ по формуле (4).

Нагрев массивных изделий электронным лучом описывается схемой нормально распределенного источника на поверхности полубесконечного тела. Для быстродвижущегося источника можно использовать соотношение (15).

С помощью электронного луча можно получать глубинные проплавления с большим отношением глубины к ширине проплавления.

Нагрев материалов потоками излучения [10]. Потоки радиации, лежащей в спектральных диапазонах — от инфракрасного до ультрафиолетового, излучаются нагретыми поверхностями в соответствии с законом Стефана—Больцмана. Интенсивность потоков излучения пропорциональна четвертой степени температуры излучающей поверхности. Поэтому практический интерес представляют только наиболее горячие источники; солнце с поверхностной температурой

около 5—6·10^3 К, вольфрамовые нити накаливания в газонаполненных лампах (4·10^3 К), дуговая или ВЧ-плазма инертного газа (7—8·10^3 К).

Излучение высокотемпературных источников. В лабораторных условиях для фотонной сварки используют сфокусированное излучение от высокотемпературных источников. Ксеноновые лампы или электрическую дугу помещают

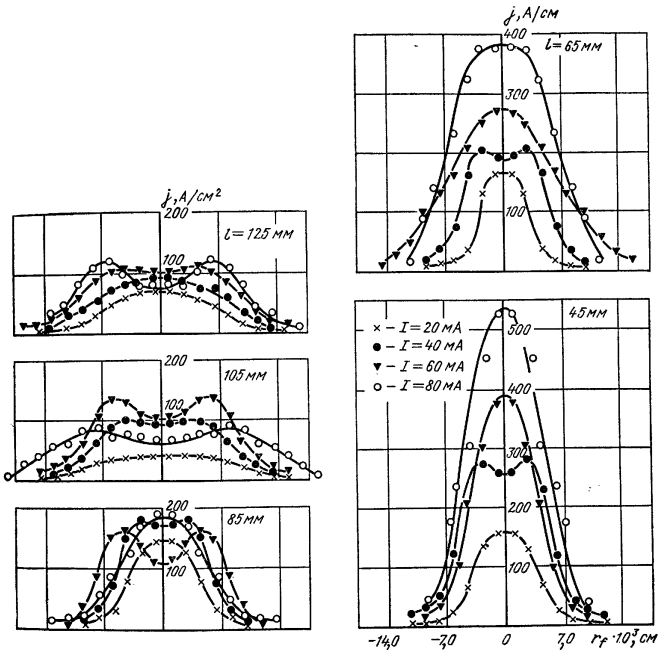


Рис. 21. Распределение плотности тока по сечению электронного луча в зависимости от тока луча для различных расстояний от центра фокусирующей системы

в одном из фокусов эллипсоидного концентратора энергии, в другом фокусе которого энергия концентрируется в пятне нагрева на изделии. Плотность потока энергии в пятне нагрева достигает 1,5·10^3 Вт/см^2, КПД установок составляет 20% (без учета отражения части излучения от поверхности нагрева). Источники излучения с мощностью в десятки киловатт в непрерывном режиме используются для сварки прерывистых швов и для точечной сварки.

Нагрев материалов лучом лазера. С технологической точки зрения излучение лазера характеризуется высокой плотностью мощности в пятне нагрева, прецизионностью, относительной простотой управления лучом. Для сварки применяют лазеры с импульсной генерацией излучения и лазеры непрерывного действия.

Характеристики импульсных лазеров. Импульсное излучение для сварки генерируют лазерные установки на рубине, стекле, легированном неодимом, и некоторые типы лазеров на смеси газов. Мощность лазеров за время импульса длительностью несколько миллисекунд достигает десятков и сотен киловатт. Энергия в импульсе лазерной сварочной установки изменяется от единиц до десятков джоулей. Поток излучения, выходящий из лазера, обладает весьма незначительной расходимостью, что позволяет с помощью оптических систем сфокусировать его в пятно малых размеров, равное десятым долям миллиметра и даже меньше. С помощью оптической системы, а также систем фильтров, частично поглощающих излучение, легко регулировать плотность мощности лазерного излучения, достигающей в пятне нагрева 10^6—10^7 Вт/см² и выше. За время импульса в несколько миллисекунд плотность потока $q_2 > 10^5$ Вт/см² позволяет достичь на поверхности практически любого непрозрачного материала температуры, превышающей точку плавления. Распределение плотности потока на поверхности материала при действии импульсного и непрерывного лазерного излучения обычно описывают с помощью закона вероятности Гаусса, учитывая отражение части лучистой энергии с помощью коэффициента отражения R, т. е.

$$q_2(r) = (1 - R)\, q_{2\max} e^{-kr^2}. \qquad (20)$$

Скорость повторения отдельных импульсов лазера, зависящая от интенсивности охлаждения кристалла, может составлять десятки герц, что позволяет сваривать непрерывные швы. КПД лазеров импульсного действия на рубине составляет 1%, для лазеров на стекле с неодимом 2%.

Характеристики лазеров непрерывного действия. В лазерах непрерывного действия поток фотонов большой мощности генерируется в возбужденных молекулярных газах, в газовых смесях или в смесях газа с парами металла. Лазеры на нейтральных атомах позволяют генерировать излучение с длинной волны преимущественно в инфракрасной части спектра и некоторые — в красной области видимого спектра. Ионные газовые лазеры дают излучение в основном видимого и ультрафиолетового диапазона. Мощность лазеров на углекислом газе (CO_2-лазеры) составляет несколько киловатт при $\eta_и = 0{,}20$. Плотность потока в пятне фокусировки, определяемая углом расходимости и параметрами оптической системы, достигает 10^5 Вт/см² и выше. CO_2-лазеры генерируют излучение в инфракрасном спектральном диапазоне (длина волны 10,6 мкм). Особенностью спектрального диапазона излучения на волне 10 мкм является значительное поглощение диэлектрическими материалами, такими, как стекло, кварц, кожа, нейлон, дерево и др. Металлы на этой волне отличаются значительным отражением, поэтому приходится принимать меры для повышения поглощательной способности посредством нанесения тонких пленок поверхностного окисления и т. д.

Мощность газодинамических лазеров, принцип работы которых основан на быстрой прокачке смеси углекислого газа, азота и гелия через зону поперечного потоку газа разряда, достигает десятков киловатт, что позволяет сваривать швы в металле толщиной до 50 мм и приблизить лазерную сварку по своим предельным возможностям к электронно-лучевой в вакууме.

Сфокусированное излучение лазеров аналогично электронному лучу позволяет получить в металле глубинные проплавления с большим отношением глубины зоны проплавления к ее диаметру. Формирование глубоких проплавлений обусловливается развитием поверхностного испарения, которое создает давление отдачи на ванну расплава, неравномерно распределенное по ее поверхности. Деформация поверхности расплава приводит к заглублению источников энергии в объем материала.

Схемы расчета тепловых процессов при сварке лазером в большинстве случаев аналогичны схемам, используемым для электронного луча. Особенности расчетных схем, методы решений и примеры приведены в работе [9].

НАГРЕВ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКЕ

Распределение теплового потока по толщине металла при электрошлаковой сварке определяется величиной тока и напряжения на электродах, расстоянием между электродами, характером движения электродов в разделке, теплоотводом в ползуны и параметрами ванны (рис. 22).

Тепловыделение по толщине металла с учетом теплоотвода в ползуны в зоне соприкосновения со шлаковой ванной может быть практически равномерным.

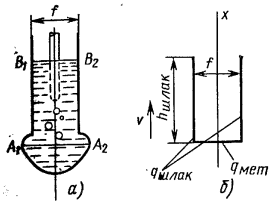


Рис 22. Схема нагрева металла при электрошлаковой сварке: *а* — схема процесса; *б* — схема движения шлаковых $q_{шлак}$ и металлического $q_{мет}$ источников теплоты

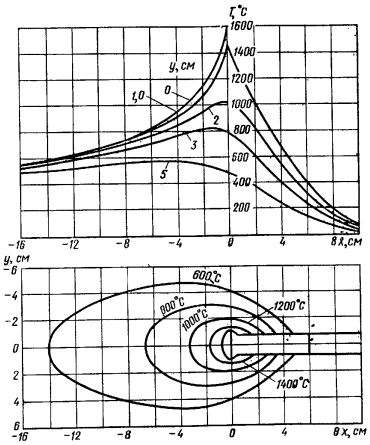


Рис. 23. Температурное поле предельного состояния при электрошлаковой сварке, рассчитанное по схеме двух шлаковых и одного металлического источников теплоты: $\delta = 10$ см; $f = 2$ см; $h_{шлак} = 6$ см; $q_{шлак} = 10^4$ Вт; $q_{мет} = 5{,}6 \cdot 10^3$ Вт; $v = 0{,}025$ см/с

Термические циклы основного металла можно рассматривать, предполагая, что тепловыделение по толщине металла равномерно.

При электрошлаковой сварке рассматривают действие источников теплоты, приносимой присадочным металлом на границе металл—шлак (рис. 22, линия A_1A_2), и теплоты, вводимой в металл шлаковой ванной по линиям A_1B_1 и A_2B_2. Мощность источников теплоты предполагается неизменной по линиям. Мощность теплового источника, действующего по линии A_1A_2 («металлический источник»),

$$q_м = S\gamma V_м, \qquad (21)$$

где S — теплосодержание единицы массы расплавленного присадочного металла при температуре шлака в активной зоне, кал/г; $V_м$ — объем присадочного металла, подаваемого в ванну в единицу времени, см³/с.

Мощность тепловых источников $q_ш$, действующих по линиям A_1B_1 и A_2B_2, определяется как разность между полной эффективной мощностью $q_{эф}$ и $q_м$.

Нагрев металла при электрошлаковой сварке можно представить как суммирование температур в данной точке от действия движущихся распределенных источников теплоты $q_м$ и $q_ш$. В области температур ниже 700—800° С распределение температуры в зоне охлаждения можно определить исходя из схемы линейного источника теплоты в пластине, считая, что интенсивность источника

по толщине пластины δ равномерна. Скорость электрошлаковой сварки мала, поэтому роль теплоотдачи довольно значительна. Критерий влияния теплоотдачи $\sqrt{1+4ba/v^2}$ при электрошлаковой сварке велик.

На рис. 23 показан пример температурного поля предельного состояния, рассчитанного по схеме трех источников теплоты при электрошлаковой сварке стальных пластин.

НАГРЕВ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ И НАПЛАВКЕ

Термический цикл, т. е. изменение температуры в данной точке шва или околошовной зоны во время сварки, является основой для оценки влияния параметров режима сварки на изменения структуры в основном металле или металле шва.

Термический цикл околошовной зоны определяется принятым режимом сварки, соответствующим заданной производительности процессов плавления основного и присадочного металлов. Часто оказывается возможным так выбирать параметры режима сварки, чтобы, удовлетворив требованиям производительности сварки и формирования шва, обеспечить термический цикл, вызывающий благоприятные изменения структуры и свойств.

К структуре зоны термического влияния и к свойствам сварного соединения предъявляют разнообразные требования, зависящие от вида металла, технологии изготовления и типа конструкции и ее служебного назначения. Так, например, при сварке легированной конструкционной стали значительная длительность нагрева выше 900° С может привести к нежелательному росту зерна аустенита, а большая скорость охлаждения в субкритическом интервале распада аустенита может вызвать повышение твердости вследствие закалки. Расчет термического цикла может установить те пределы технологического режима сварки, при которых не происходит местного изменения пластических свойств, могущих понизить несущую способность сварного соединения, особенно при ударной нагрузке, при наличии концентраторов напряжения и при низких температурах эксплуатации.

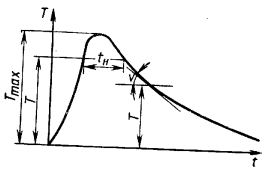


Рис. 24. Схема термического цикла околошовной зоны при однопроходной сварке или наплавке

Однопроходная сварка. Основными параметрами термического цикла околошовной зоны при однопроходной сварке или наплавке являются максимальная температура T_{max}, мгновенная скорость охлаждения v, °С/с при данной температуре T и длительности нагрева $t_н$ выше данной температуры T (рис. 24).

При дуговой наплавке валика на массивное изделие (см. рис. 4 и 25, *а*) скорость охлаждения, °С/с при T

$$w = \frac{2\pi\lambda (T-T_0)^2}{q/v}, \qquad (22)$$

а при сварке листов встык в один проход или при наплавке валика на лист малой толщины (см. рис. 5 и 25, *в*)

$$w = \frac{2\pi\lambda c\gamma (T-T_0)^3}{(q/v\delta)^2}, \qquad (23)$$

где T_0 — начальная температура изделия, или температура сопутствующего подогрева.

При наплавке валика на лист произвольной толщины (рис. 25, *б*) скорость охлаждения рассчитывают по номограммам (рис. 26, *а* и *б*). При расчете скорости

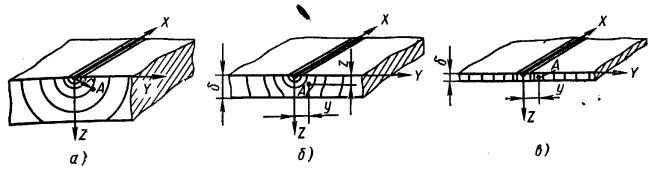


Рис. 25. Схемы распространения теплоты: *а* — точечный источник в пластине большой толщины; *б* — точечный источник в пластине произвольной толщины; *в* — линейный источник в пластине малой толщины

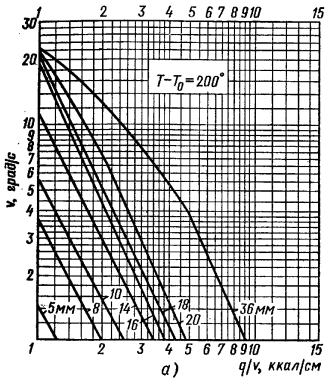
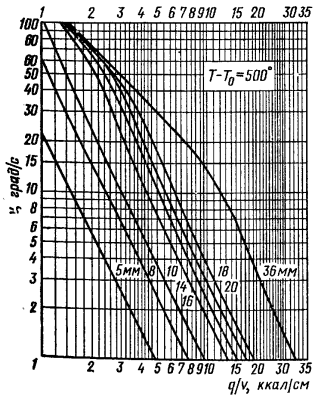
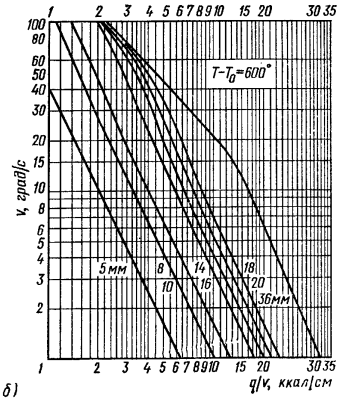


Рис. 26. Номограммы:

а — для определения скорости охлаждения v при $T - T_0 = 220°$ С; *б* — для определения скорости охлаждения v околошовной зоны при наплавке валика на поверхность пластины при $T - T_0 = 500$ и 600° С





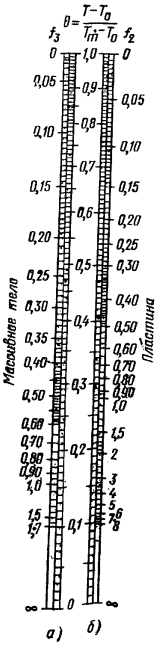
5. Коэффициенты приведения

Приводимая величина	Первый слой стыка, угол разделки 60°	Наплавка, однопроходная сварка встык	Первый слой при соединении тавровом, нахлесточном
q/v	3/2	1	2/3
δ	3/2	1	1

охлаждения по номограммам или по выражениям (22) и (23) вместо истинных значений погонной энергии q/v и толщины металла δ вводят их приведенные значения, полученные умножением $\frac{q}{v}$ и δ на коэффициенты, учитывающие влияние конструкции соединения (табл. 5).

Длительность $t_н$ нагрева выше данной температуры при наплавке валика на массивное тело

$$t_н = f_3 \frac{q/v}{\lambda (T_{max} - T_0)} \qquad (24)$$



пропорциональна погонной энергии дуги $\frac{q}{v}$, а при однопроходной сварке листов встык

$$t_н = f_2 \frac{(q/v\delta)^2}{\lambda c \gamma (T_{max} - T_0)^2} \qquad (25)$$

пропорциональна квадрату удельной энергии дуги $\frac{q}{v\delta}$. Здесь T_{max} — максимальная температура цикла (см. рис. 24). Коэффициенты f_3 и f_2 выбирают в зависимости от безразмерной температуры $\theta = \frac{T - T_0}{T_{max} - T_0}$, изменяющейся в пределах от 0 до 1 по номограмме рис. 27.

Многослойная сварка длинными участками. Каждый слой успевает почти полностью охладиться ко времени укладки следующего слоя. Поэтому термические циклы отдельных слоев практически не зависят друг от друга. Но смягченное тепловое воздействие последующих слоев может изменить структуру шва и околошовной зоны, например, отпустить закаленную структуру. На рис. 28 показаны термические циклы в точках 1,2,3, расположенных на разных расстояниях от корня шва.

При сварке стали, склонной к закалке и образованию холодных трещин, проверяют условия охлаждения первого слоя, в околошовной зоне которого при быстром охлаждении и резкой закалке могут образовываться трещины.

Рис. 27. Номограммы для расчета длительности нагрева $t_н$ выше заданной температуры T:

а — при наплавке валика на массивное тело; *б* — при однопроходной сварке листов встык

Последующие слои при одинаковом поперечном сечении, как правило, остывают медленнее первого слоя, поэтому условия их охлаждения можно не проверять.

Скорость охлаждения v первого слоя многослойного шва рассчитывают по соотношению (22) и номограммам (см. рис. 26) для наплавки валика на лист.

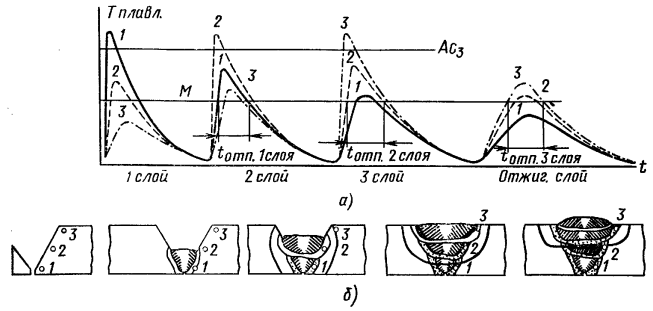


Рис. 28. Термический цикл (*а*) и схема структурных изменений (*б*) при многослойной сварке длинными участками

Различные условия теплоотвода учитывают, вводя в расчет вместо истинных значений толщины свариваемых листов и погонной энергии дуги $\frac{q}{v}$ их расчетные значения, взятые по рис. 29. Скорость охлаждения можно снизить увеличением

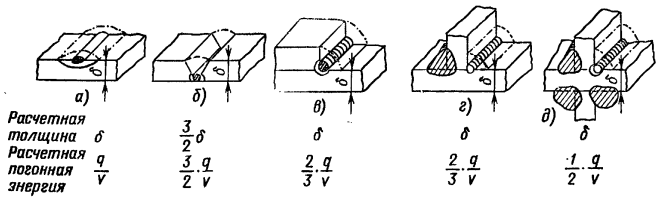


Рис. 29. Расчетные значения толщины и погонной энергии для определения скорости охлаждения первого слоя многослойного шва:

а — наплавка на лист; *б* — соединение встык с односторонним скосом кромок; *в* — соединение внахлестку; *г* — тавровое соединение (второй шов); *д* — крестовое соединение (четвертый шов)

погонной энергии, т. е. увеличением сечения слоев, и повышением температуры подогрева изделия.

Многослойная сварка короткими участками. Тепловые воздействия последовательно накладываемых слоев складываются, замедляя охлаждение отдельного слоя и образуя сложный термический цикл (рис. 30, *а* и *б*). Режим многослойной сварки (каскадной, горкой) характеризуется двумя независимыми параметрами—

погонной энергией $\frac{q}{v}$ (сечением слоя) и длиной l участка, поэтому он более гибок, чем режим однопроходной сварки.

Длину участка выбирают из условия, чтобы температура $T_в$ околошовной зоны первого слоя к моменту наложения тепловой волны следующего слоя не падала ниже точки M начала мартенситного превращения (200—350° С) или ниже температуры, при которой наиболее вероятно образование холодных трещин (60—200° С). Длину участка, при которой первый слой с температурой T_0 (начальной, или температурой сопутствующего подогрева) охладится до температуры $T_в$, вычисляют по соотношению

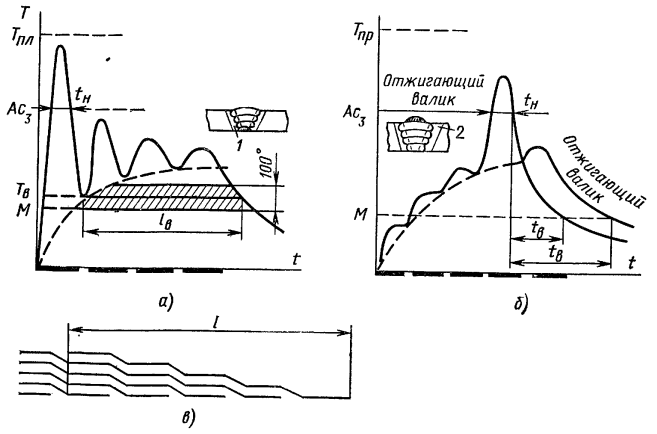


Рис. 30. Термический цикл околошовной зоны при многослойной сварке короткими участками:

а — первый слой (точка *1*); *б* — последний слой (точка *2*); *в* — схема каскадной сварки

$$l=\frac{0{,}7k_2k_3q^2}{\delta^2v\,(T_в-T_0)^2}, \qquad (26)$$

где q — эффективная мощность дуги при заварке первого слоя, кал/с; v — скорость перемещения дуги, см/с; k_2 — коэффициент чистого горения дуги, равный единице для автоматической многодуговой сварки и 0,6—0,8 для ручной многослойной сварки; k_3 — поправочный коэффициент, равный 1,5 для стыкового соединения, 0,9 для соединения втавр и 0,8 для крестового соединения.

Режим многослойной сварки короткими участками можно подобрать так, чтобы шов и околошовная зона находились в нижнем субкритическом интервале, от температуры T_{min} наименьшей устойчивости аустенита до температуры $T_м$ начала мартенситного превращения (рис. 31, *а*), в течение такого времени (см. рис. 30, *а*, *б*), которое обеспечивает распад аустенита в игольчатый троостит, обладающий высокой пластичностью. Длительность $t_з$ нагрева околошовной зоны первого слоя выше определенной температуры T, которую принимают на 50° С выше температуры $T_м$, при сварке металла с начальной температурой T_0 рассчи-

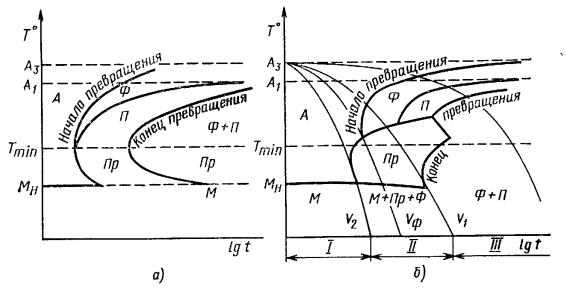


Рис. 31. Диаграммы превращения аустенита:

а — изотермическое превращение; *б* — анизотермическое превращение (непрерывное охлаждение); v_1 — скорость охлаждения, соответствующая началу образования мартенсита; v_2 — скорость охлаждения, при которой образуется 100% мартенсита; *I* — зона полной закалки; *II* — зона частичной закалки; *III* — зона стабильных структур; $v_ф$ — скорость, при которой начинается выделение феррита; *А* — аустенит; *Ф* — феррит; *П* — перлит; *Пр* — промежуточные структуры; *М* — мартенсит

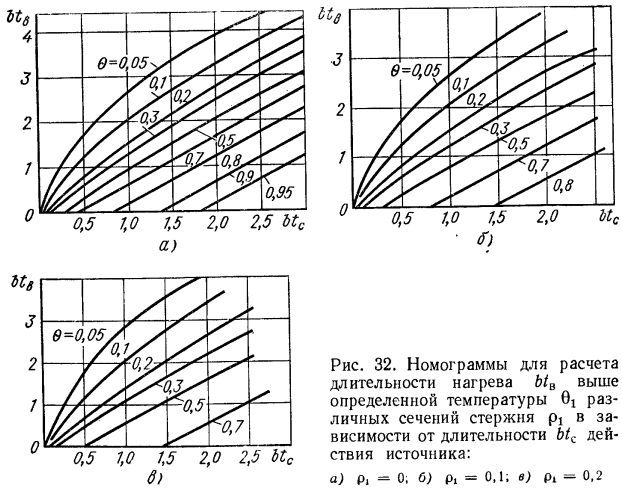


Рис. 32. Номограммы для расчета длительности нагрева $bt_в$ выше определенной температуры θ_1 различных сечений стержня ρ_1 в зависимости от длительности bt_c действия источника:

а) $\rho_1 = 0$; *б*) $\rho_1 = 0{,}1$; *в*) $\rho_1 = 0{,}2$

тывают в зависимости от общей длительности сварки t_c по номограммам (рис. 32), связывающим безразмерные параметры

$$bt_в;\ bt_c;\ \rho_1 = \sqrt{\frac{b}{a}}\,|x|$$

и

$$\theta = \frac{2\lambda\delta l}{k_1 k_2 q}\sqrt{\frac{b}{a}}\,(T - T_0),$$

где $b = \frac{2\alpha}{c\gamma\delta}\,c^{-1}$ — коэффициент температуроотдачи расчетного стержня; $|x|$ — расчетное расстояние околошовной зоны от источника, для стыковых швов равное полуширине разделки поверху, а для валиковых швов — половине длины катета шва; k_2 — коэффициент чистого горения дуги; k_1 — коэффициент приведения, равный 1,0 — для стыкового соединения 0,67 — для таврового и нахлесточного соединений и 0,6 — для крестового соединения.

Длительность нагрева выше заданной температуры тем больше, чем больше поперечное сечение шва, т. е. чем больше толщина листа и угол разделки кромок.

ПЛАВЛЕНИЕ МЕТАЛЛА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

Дуга расплавляет электрод, подогреваемый током на участке от токоподвода до дуги.

Прутковые электроды. Нагрев пруткового электрода обусловлен выделением теплоты по закону Джоуля—Ленца в металлическом стержне и потерей теплоты через боковую поверхность в окружающую среду.

Температуру $T(t)$,°С стального пруткового электрода диаметром d_1, мм, нагреваемого током I А от начальной температуры $T_0 = 0$ °С, можно представить в зависимости от длительности нагрева t, с, номограммой (рис. 33). Величины n, c^{-1} и $T_{пр}$, °С, входящие в состав безразмерных критериев номограммы, выражаются так:

$$n = \frac{A}{md_1}\left(\frac{T_{пр}}{D_1} + 1\right); \qquad (27)$$

$$T_{пр} = md_1 j^2, \qquad (28)$$

где $j = \frac{I}{\frac{\pi}{4}d_1^2}$ — плотность тока в электродном стержне, А/мм².

Коэффициенты A, $\frac{мм^4 \cdot °С}{А^2 \cdot с}$; D_1, °С и m, $\frac{мм^3 \cdot °С}{А^2}$, зависящие от теплофизических свойств электродов, выбирают по табл. 6.

6. Коэффициенты для расчета нагрева электродов током

Тип электрода		Род тока	A, $\frac{мм^4 \cdot °С}{А^2 \cdot с} \times 10^{-1}$	D_1, °С	m, $\frac{мм^3 \cdot °С}{А^2}$
Проволока	Покрытие				
Низкоуглеродистая	Меловое	Постоянный Переменный	3,1 3,7	240 300	2,65
	ОММ-5 и УОНИ-13	Постоянный Переменный	2,4 2,7	200 240	2,5

Электродная проволока. При автоматической или полуавтоматической сварке наибольшую температуру T_{max} подогрева проволоки в конце вылета (у дуги), при длине вылета l, см, можно рассчитать по номограмме (рис. 33), приняв длительность t нагрева каждого материального элемента проволоки, поступающей в дугу со скоростью v, см/с, равной l/v.

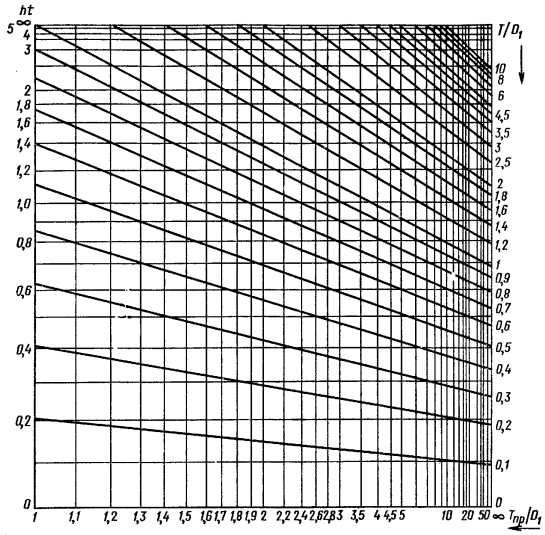


Рис. 33. Номограмма для расчета процесса нагрева током электрода из низкоуглеродистой стальной проволоки

При высоких плотностях тока в электродной проволоке, $j > 40 \div 50$ А/мм², наибольшую температуру T_{max} в конце вылета можно определить также из соотношения

$$T_{max} = (D_1 + T_0)\exp\left(\frac{3600\gamma A}{\alpha_p D_1} jl\right) - D_1, \qquad (29)$$

где α_p — коэффициент расплавления, г/(А·ч); T_0 — начальная температура проволоки, °С.

Расплавление электродов. Дуга прогревает металл электродного прутка или проволоки, предварительно подогретый током до температуры T_{max}, расплавляет и перегревает его до средней температуры $T_к$ капель, отрывающихся от торца электрода. Производительность расплавления электрода g_p, г/с, и скорость расплавления v, см/с, связаны с полной электрической мощностью дуги, Вт, соотношением

$$g_p = v\gamma\frac{\pi}{4}d^2\frac{0{,}24\eta_э UI}{S_к - S_{max}}, \qquad (30)$$

где $\eta_э$ — эффективный КПД процесса нагрева электрода дугой; $S_к$ и S_{max} — теплосодержание металла голого электрода при температурах $T_к$ и T_{max}, или отнесенное к единице массы стержня теплосодержание металла и слоя покрытия, кал/г.

Выраженная соотношением (30) мгновенная производительность $g_р$ или пропорциональная ей мгновенная скорость расплавления возрастает по мере оплавления электродного прутка вследствие подогрева током. Производительность или скорость плавления электродной проволоки остаются постоянными при данных условиях процесса, но возрастают с увеличением длины вылета проволоки вследствие повышения температуры подогрева током.

НАГРЕВ СТЕРЖНЕЙ ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ

Источники теплоты при стыковой сварке. Свариваемые стержни на участке между токоподводами нагреваются:

распределенным по объему металла источником — работой тока плотностью j, А/см², на удельном сопротивлении металла ρ, Ом·см; по закону Джоуля—Ленца, объемная мощность источника $w = 0{,}24\ \rho j^2$, кал/(см³·с);

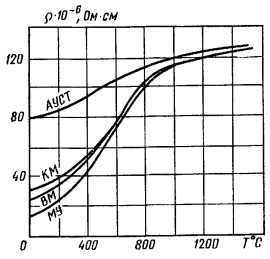


Рис. 34. Изменение удельного сопротивления стали с температурой (*МУ* — малоуглеродистая, *ВМ* — высокомарганцовистая, *КМ* — кремнемарганцовистая, АУСТ — аустенитная электродная проволока)

приложенным к контактным поверхностям с поперечным сечением F, см², плоским источником с удельной мощностью q_2, кал/см²·с, представляющим работу тока jF на контактном сопротивлении $R_{Ом}$ (при нагреве сопротивлением) или на сопротивлении R перемычек металла между торцами (при сварке оплавлением), $q_2 = 0{,}24\ Rj^2F$.

Удельное сопротивление металла возрастает с температурой, причем особенно резко у ферромагнитных металлов [железа и стали в α-фазе (рис. 34)]. Для расчетов нагрева током в широком интервале температуры следует учитывать температурную зависимость отношения удельного сопротивления ρ к объемной теплоемкости $c\gamma$. Эту зависимость приближенно описывают линейным соотношением

$$\frac{\rho}{c\gamma} = \frac{\rho_0}{(c\gamma)_0}(1+\beta T). \qquad (31)$$

Расчетные значения отношения $\rho_0/(c\gamma)_0$ при нулевой температуре и температурного коэффициента β приведены в табл. 7.

При стыковой сварке стержней сопротивлением мощность дополнительного приконтактного источника q_2, представляющего работу тока, сосредоточенного в приторцовой области у местных площадок соприкосновения, быстро убывает в ранней стадии процесса.

Поэтому для расчета температуры нагрева в поздней стадии процесса приконтактный источник считают мгновенным, приложенным в момент начала нагрева ($t = 0$) с удельной теплотой, кал/см²

$$Q_2 = \frac{\mu\sqrt{\lambda c\gamma}}{\beta j\sqrt{0{,}24\beta\rho_0/(c\gamma)_0}} = \frac{k}{j}; \qquad (32)$$

здесь k и μ — расчетные коэффициенты, зависящие от свойств металла стержней и от давления (табл. 7). Большим давлениям соответствуют меньшие значения расчетных коэффициентов.

7. Коэффициенты для расчета нагрева стержней при контактной сварке встык

Материал	$\frac{\rho_0}{(c\gamma)_0}10^6$, Ом·см⁴·°С/кал	$\beta\cdot10^3$, 1/°С	μ	τ	$j^2t\cdot10^{-6}$, А²·с/см⁴	$k\cdot10^{-6}$, кал·А/см⁴
Сталь 10	15	3,8	2,6—3	1,27—1,21	93—89	0,19—0,24
Сталь 45	22	3,0	2,0—2,3	1,18—1,14	75—72	0,17—0,21
Сталь 25	23,5	2,23	1,6—1,8	0,98—0,94	78—75	0,21—0,25
Сталь инструментальная (0,1% С; 0,58% Mn; 12,2% Cr)	35	1,36	0,9—0,95	0,76—0,74	67—65	0,20—0,23
Сталь Р18	50	0,64	0,32—0,34	0,95	124	0,18—0,22
Сталь коррозионностойкая (аустенитно-мартенситная)	72	0,28	0,07—0,08	0,30	62	0,09—0,12
Алюминий	5,65	2,33	0,34—0,36	0,8	250	0,17—0,18
Медь	2,2	2,8	0,14—0,15	1,3—1,25	880—850	0,12—0,13

При прерывистом подогреве стержней током перед оплавлением свариваемые торцы периодически замыкают и затем размыкают, обычно не менее 3—5 раз. Ток при последовательных замыканиях изменяется мало. Поэтому расчет процесса прерывистого подогрева можно вести по схеме непрерывного нагрева:

осредненной за все время процесса среднеквадратичной силой тока с плотностью

$$j_{эф} = j\sqrt{\frac{\Sigma t_в}{t_п}}, \qquad (33)$$

где $t_п$ — общая длительность прерывистого подогрева, с; $\Sigma t_в$ — суммарная длительность периодов включения, с (рис. 35);

длительным приконтактным источником с неизменяющейся за время процесса удельной мощностью q_2, выражающейся через условное падение напряжения на контакты $U_к$:

$$q_2 = 0{,}24U_к j_{эф}, \qquad (34)$$

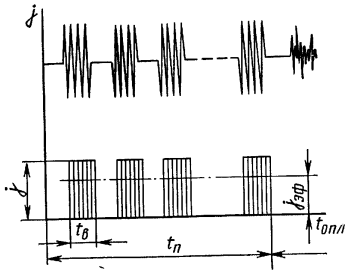


Рис. 35. Схема изменения тока при прерывистом подогреве

величину которого выбирают в пределах 0,4—0,6 В. Более высокие значения $U_к$ соответствуют интенсивному искрообразованию при малых скоростях движения зажима машины и большим сечениям свариваемых стержней.

Схема нагрева при стыковой контактной сварке. В процессе нагрева стержней при стыковой контактной сварке расчетную температуру рабочих участков целесообразно осреднить по поперечному сечению стержней. Хотя измеренная неравномерность особенно в ранней стадии процесса, может быть значительной, в последней стадии температура практически выравнивается. Практически возможно рассчитать температуру рабочих участков свариваемых стержней, нагреваемых током и приконтактным источником.

Для расчета удобна схема неограниченного стержня, нагреваемого равномерно распределенным по длине неизменяющимся током и сосредоточенным приконтактным источником — мгновенным Q_2 или непрерывным q_2. Эта схема хорошо описывает кратковременный процесс нагрева длинных рабочих участков стержней из малотеплопроводного металла при высокой плотности тока.

Температура рабочих участков (рис. 36)

$$T(x,\ t)=T_1(t)+T_2(x,\ t), \qquad (35)$$

где $T_1(t)$ — температура нагрева бесконтактного стержня неограниченной длины током плотностью j, работающим на сопротивлении ρ, линейно возрастающим с температурой; $T_2(x,\ t)$ — температура местного нагрева стержней приконтактным источником Q_2 или q_2 и током плотностью j, работающим на сопротивлении, пропорциональном температуре.

Нагрев бесконтактного стержня. Температура нагрева неизменяющимся током $j=\text{const}$ стержня с сопротивлением, линейно возрастающим с температурой, выражается законом

$$\beta T_1(t)=\exp(\beta v_0 t)-1, \qquad (36)$$

где $v_0=0{,}24\dfrac{\rho_0}{(c\gamma)_0}j^2$ — начальная скорость нагрева, °С/с.

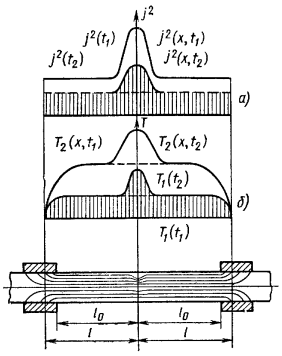


Рис. 36. Распределение температуры по длине свариваемых стержней:

а — в начале (момент t_1) и *б* — в конце (момент t_2) процесса нагрева током при однократном замыкании

Местный нагрев при сварке сопротивлением. Температуру местного нагрева однократно замкнутых стержней в поздней стадии процесса рассчитывают по схеме мгновенного плоского источника Q_2 в неограниченном стержне, нагреваемом током $j=\text{const}$:

$$T_2(x,\ t)=\frac{Q_2}{c\gamma\sqrt{4\pi at}}\exp\left(\beta v_0 t-\frac{x^2}{4at}\right). \qquad (37)$$

Чтобы сварить стержни встык сопротивлением, необходимо нагреть плоскость контакта до определенной для данного материала $T_к$, лежащей ниже температуры плавления (для стали 1250—1350 °С), и прогреть приконтактную зону длиной $2l_{ос}$ выше $T_д$ пластического деформирования (для стали 500—700° С), с тем чтобы обеспечить достаточную пластическую осадку. Время нагрева контактного сечения до $T_к$ определяют из соотношений (35)—(37), считая $x=0$. Заданной температуре нагрева соответствует для данного материала определенная величина произведения $j^2t_н$ (см. табл. 7). Таким образом, необходимая длительность нагрева для сварки встык сопротивлением стержней для данного металла обратно пропорциональна квадрату плотности тока.

Процесс выравнивания. Температуру в стадии выравнивания по окончании нагрева током длительностью $t_н$ при однократном замыкании определяют как сумму двух температур:

температуры рабочего участка длиной $2l$ в неограниченно длинном стержне, равномерно нагретом до $T_1(t_н)$,

$$T_1(x,\ t)=\frac{1}{2}T_1(t_н)\left[\operatorname{erf}\frac{x+l}{\sqrt{4a(t-t_н)}}-\operatorname{erf}\frac{x-l}{\sqrt{4a(t-t_н)}}\right];\quad t\geqslant t_н, \qquad (38)$$

где $\operatorname{erf}(u)\equiv\Phi(u)=\dfrac{2}{\sqrt{\pi}}\int\limits_0^u\exp(-u^2)\,du$ — функция интеграла Гаусса;

температуры $T_2(x,\ t)$, которая нормально распределена по оси OX с постоянной времени $t_н$, выражаемой соотношением (37):

$$T_2(x,\ t)=\frac{Q_2}{c\gamma\sqrt{4\pi at}}\exp\left(\beta v_0 t_н-\frac{x^2}{4at}\right);\quad t\geqslant t_н. \qquad (39)$$

Местный прерывистый нагрев стержней током при сварке оплавлением. Температуру местного нагрева периодически замыкаемых и размыкаемых стерж-

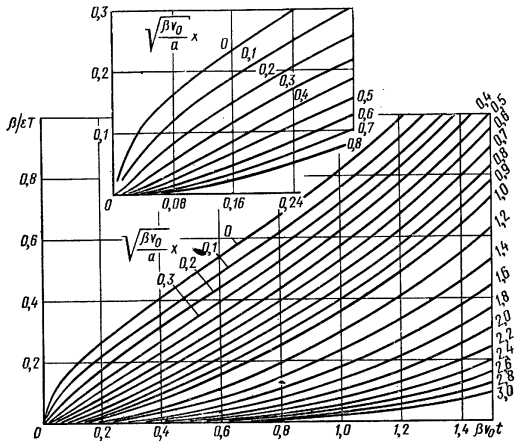


Рис. 37. Номограмма для расчета местного нагрева стержня с сопротивлением, пропорциональным температуре, длительным плоским источником q_2 и неизменяющимся током с плотностью j: зависимость безразмерной температуры $\sqrt{\lambda c\gamma\beta v_0}\,\dfrac{T}{q_2}$ от безразмерного времени $\beta v_0 t$ и безразмерного расстояния $\sqrt{\dfrac{\beta v_0}{a}}\,x$ от контакта

ней рассчитывают по схеме плоского длительного источника постоянной удельной мощности q_2 [формула (34)] в неограниченном стержне, нагреваемом неизменяющимся во время процесса эффективной силой тока плотностью $j_{эф}$ [формула (33)]:

$$\beta T_2(x,\ t)=\frac{q_2\sqrt{\beta}}{2\sqrt{\lambda c\gamma v_0}}\exp\left[\beta v_0 t-\frac{x^2}{4at}\right]\nu\left(\sqrt{\beta v_0 t};\ \frac{x}{\sqrt{4at}}\right); \qquad (40)$$

здесь $\nu(x,\ y)$ — мнимая часть интеграла вероятности от комплексного аргумента [12]. Термические циклы нагрева точек, находящихся на различных расстояниях x от контактной плоскости, представлены на рис. 37 в безразмерной форме.

Полная температура контактного сечения $x = 0$ по выражения (36) и (40)

$$\beta T(0, t) = [\exp(\beta v_0 t) - 1] + \frac{\varepsilon}{2} \exp(\beta v_0 t)\, \nu(\sqrt{\beta v_0 t};\ 0) \qquad (41)$$

представлена в зависимости от безразмерного времени $\beta v_0 t$ графиком на рис. 38. Здесь $\varepsilon = q_2 \sqrt{\frac{\beta}{\lambda c \gamma v_0}}$ — критерий мощности длительного плоского источника.

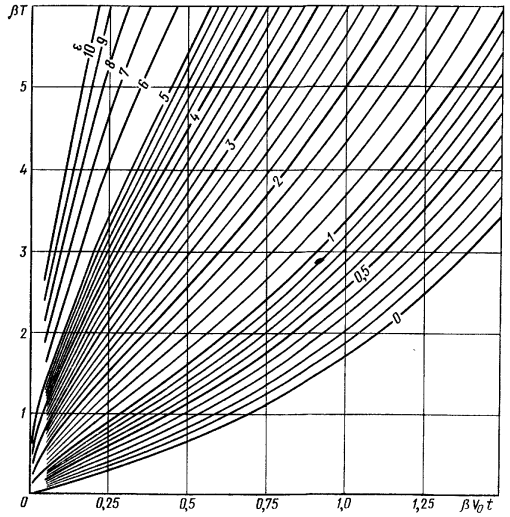


Рис. 38. Номограмма прерывистого подогрева стержней током при контактной сварке оплавлением; безразмерная температура βT контактного сечения в зависимости от безразмерного времени процесса $\beta v_0 t$ и критерия мощности $\varepsilon = q_2 \sqrt{\frac{\beta}{\lambda c \gamma v_0}}$; кривая $\varepsilon = 0$ соответствует бесконтактному нагреву

Нагрев при оплавлении после прерывистого подогрева. Стадия оплавления стержней, предварительно подогретых прерывистым сопротивлением, обычно непродолжительна, и ток плотностью $j_{опл}$ в этой стадии меньше эффективного тока подогрева $j_{эф}$. Скорость оплавления мало изменяется за время процесса. Опыты показывают, что распределение температуры в рабочих участках стержней, достигнутое к концу стадии прерывистого подогрева, мало изменяется за время стадии оплавления. Поэтому распределение температуры к концу оплавления считают приблизительно одинаковым с распределением к концу стадии прерывистого подогрева, но температуру оплавляемого торца полагают равной температуре плавления.

Нагрев стержней при непрерывном оплавлении. Сварку непрерывным оплавлением без подогрева ведут обычно при сравнительно низкой плотности тока, но с возрастающей скоростью, задаваемой перемещением подвижных зажимов машины. При таком процессе зона, прилегающая к оплавляемым торцам, постепенно прогревается в основном за счет теплопроводности от сосредоточенного в контактной плоскости источника и в меньшей мере — теплотой Джоуля—Ленца, выделяемой в объеме рабочих стержней. При оплавлении с равномерно возрастающей скоростью $v = st$ (где s — ускорение, см/с², практически мало изменяющееся в конечной стадии процесса) распределение температуры в приконтактной области описывается эмпирическим выражением Э. Ниппса

$$T(x) = T_{пл} \exp\left[-0{,}92\left(\frac{s}{a^2}\right)^{1/3} x\right], \qquad (42)$$

где $T_{пл}$ — температура плавления металла, °С; x — расстояние от оплавляемого торца, см.

При сварке оплавлением необходимо для обеспечения осадки прогреть, как и при сварке сопротивлением, зону длиной $2l_{ос}$ выше температуры $T_д$. Максимально допустимое ускорение определяется из выражения (42):

$$s_{max} = 1{,}3\,\frac{a^2}{l_{ос}^2}\left(\ln\frac{T_{пл}}{T_д}\right)^3. \qquad (43)$$

Охлаждение стержней после сварки непрерывным оплавлением. Температура стыкового сечения после окончания процесса оплавления (после выключения тока) определяется из выражения

$$T(0, t) = T_{пл} \exp(mt)\,\mathrm{erfc}\sqrt{mt}, \qquad (44)$$

где t — время после выключения тока, с; $m = 0{,}85\left(\frac{s^2}{a}\right)^{1/3}$ с$^{-1}$.

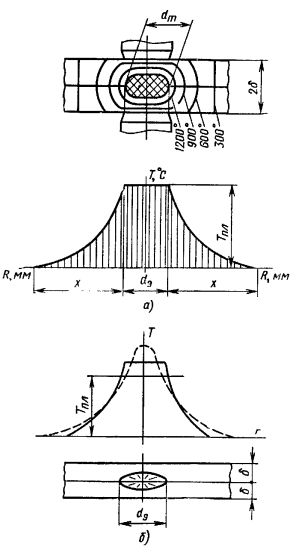


Рис. 39. Распределение температуры при точечной сварке:

а — действительное и расчетное для определения Q; *б* — в момент выключения тока

Нагрев при точечной сварке листов. Необходимое для сварки отдельной точки количество теплоты $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$ расходуется на нагрев:

центрального столбика металла свариваемых листов толщиной 2δ с объемной теплоемкостью $c\gamma$, зажатого между электродами диаметром $d_э$, до расчетной температуры $T_{пл}$ (рис. 39):

$$Q_1 = \frac{\pi}{4} d_э^2 2\delta c\gamma T_{пл}; \qquad (45)$$

кольца металла толщиной x, окружающего центральный столбик, до температуры $\frac{1}{4} T_{пл}$:

$$Q_2 = k_1 \pi x (d_э + x)\, 2\delta c\gamma \frac{1}{4} T_{пл}, \qquad (46)$$

где $x = 4\sqrt{at}$; a — коэффициент температуропроводности металла листов; t — длительность нагрева; $k_1 = 0{,}8$ — коэффициент, учитывающий неравномерность нагрева кольца;

прилегающего к контакту участка электродов толщиной x' до температуры $\frac{1}{8}T_{пл}$:

$$Q_3 = 2k_2 \frac{\pi}{4} d_э^2 x' c'\gamma' \frac{1}{8} T_{пл}, \qquad (47)$$

где $c'\gamma'$ — объемная теплоемкость металла электродов; k_2 — коэффициент, зависящий от формы электродов (при цилиндрическом электроде $k_2 = 1$; при коническом $k_2 = 1{,}5$; при сферической контактной поверхности $k_2 = 2$).

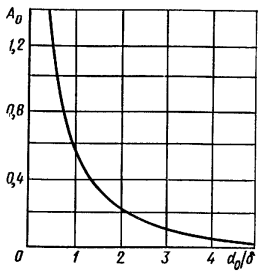


Рис. 40. График коэффициента A_0 для определения собственного сопротивления деталей при точечной сварке

Задаваясь технологически целесообразной длительностью сварки t, можно рассчитать необходимый ток I_2 во вторичной цепи:

$$I_2 = \sqrt{\frac{Q}{0{,}24 m R_{гор} t}}; \qquad (48)$$

здесь $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$; m — коэффициент, учитывающий изменение сопротивления в процессе сварки (для стальных деталей $m = 1 \div 1{,}1$; для алюминиевых сплавов $m = 1{,}2 \div 1{,}4$); $R_{гор} = A_0 k \frac{\rho_t}{\delta}$ — горячее сопротивление участка сварочной цепи между электродами; ρ_t — удельное сопротивление нагретого металла до температуры, несколько меньшей температуры плавления (для стали 1200—1300° С); $k = 0{,}8 \div 0{,}9$ — коэффициент, учитывающий понижение сопротивления деталей вследствие растекания тока в менее нагретую зону металла; A_0 — коэффициент, зависящий от отношения d_0/δ (рис. 40); d_0 — диаметр, средний между диаметром электрода и диаметром точки.

Охлаждение сварной точки в листах толщиной δ после выключения тока и размыкания электродов описывается схемой мгновенного нормально-кругового источника в тонкой пластине с теплоотдачей

$$T(r, t) = \frac{Q}{4\pi\lambda 2\delta (t_0 + t)} \exp\left[-\frac{r^2}{4a(t_0+t)} - \frac{\alpha t}{c\gamma\delta}\right]; \qquad (49)$$

здесь $Q = Q_1 + Q_2$ — количество теплоты, введенное в металл листа; t_0 — постоянная времени нормально распределенного источника, характеризующая распределение теплоты по радиусу в момент выключения тока; $t = 0$.

Мгновенная скорость v °С/с, охлаждения центральной точки при $T < 0{,}5T_{пл}$

$$v = \frac{4\pi\lambda (T - T_0)^2}{Q/2\delta}, \qquad (50)$$

где T_0 — начальная температура свариваемых листов.

НАГРЕВ СТЕРЖНЕЙ ПРИ СТЫКОВОЙ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ

Источник теплоты. При нагреве трением теплота выделяется в тонком приповерхностном слое металла, прилегающем к торцам трущихся стержней. Тепловая мощность q, кал/с, источника, эквивалентная мгновенной работе трения за единицу времени, в начальной стадии процесса возрастает, достигает максимума, а затем постепенно падает, стремясь к постоянному значению. Удельная тепловая

мощность q_2, кал/(см²·с), плоского источника в начальной стадии процесса распределена неравномерно по поперечному сечению стержней, причем наружная область нагревается быстрее внутренней. По мере прогрева приторцовой зоны и развития пластических деформаций осадки удельная тепловая мощность выравнивается по площади торцов. Для расчета длительности нагрева при сварке трением и термического цикла в приконтактной зоне можно полагать источник теплоты равномерно распределенным по сечению и неизменяющимся со временем. Расчетная мощность плоского источника выражается соотношением

$$q = kAvp = k\frac{\pi A}{60} f d n P; \qquad (51)$$

здесь P — осевое сжимающее усилие, кгс; n — частота вращения стержня, об/мин; d — диаметр (наружный) свариваемых стержней, см; f — коэффициент трения скольжения на рабочей торцовой поверхности; p — давление, кгс/мм²; v — средняя линейная скорость относительного перемещения стержней, см/с; $A = 2{,}34 \cdot 10^{-2}$, кал/(кгс·см) — тепловой эквивалент механической работы; k — коэффициент, зависящий от характера распределения удельной мощности трения по поперечному сечению торца (при равномерном распределении мощности $k = 1$; если мощность в круглом стержне возрастает пропорционально удалению от центра, $k = 2/3$).

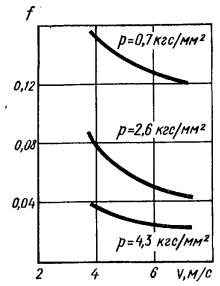


Рис. 41. Зависимость среднего коэффициента трения в процессе нагрева труб диаметром 160/120 мм из стали 45 от средней линейной скорости v и давления (А. С. Гельман и М. П. Сандер)

Коэффициент трения f на рабочей поверхности для данной пары трущихся металлов зависит от давления, линейной скорости относительного перемещения и от температуры. С увеличением в известных пределах давления и средней линейной скорости v коэффициент трения уменьшается (рис. 41—43). Удельная тепловая мощность трения q_2 при вращении труб большого диаметра из среднеуглеро-

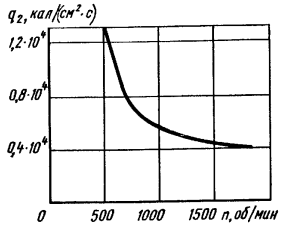


Рис. 42. Зависимость средней удельной мощности при нагреве стержней диаметром 20 мм из стали Ст3 от окружной скорости (В. И. Вилль)

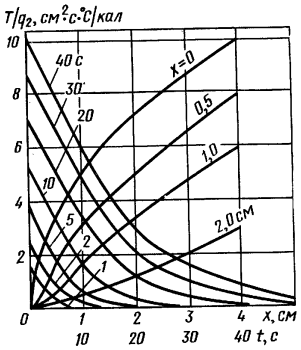


Рис. 43. Зависимость нагрева торцовым трением стержней из низкоуглеродистой стали от x и t ($\lambda = 0{,}1$ кал/(см·с·°С); $a = 0{,}08$ см²/с); изохроны t = const и кривые термического цикла x = const

дистой стали изменяется сравнительно мало [от 85 до 150 кал/(см²·с)]. Таким образом, даже изменением основных параметров процесса трения в широких технологически доступных пределах нельзя существенно изменить его тепловую мощность. Удельная тепловая мощность при нагреве трением стержней из малоуглеродистой стали падает с увеличением окружной скорости (см. рис. 42).

Процесс нагрева трением торцов стержней одинакового сечения, круглых или трубчатых из материала с одинаковыми теплофизическими свойствами описывается схемой плоского источника с удельной мощностью трения q_2, равномерно распределенной по площади торцов и неизменяющейся за время процесса в неограниченно длинном стержне с поверхностной теплоотдачей.

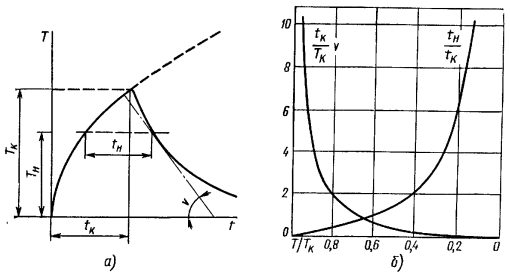


Рис. 44. Выравнивание температуры по окончании нагрева при сварке трением: *а* — схема термического цикла нагрева и охлаждения; *б* — зависимость длительности нагрева и скорости охлаждения от мгновенной температуры

При нагреве стержней диаметром более 20 мм и труб с толщиной стенки > 15 мм можно пренебрегать влиянием поверхностной теплоотдачи; в этом случае температура выразится соотношением

$$T(x, t)=\frac{q_2\sqrt{t}}{\sqrt{\lambda c\gamma}}\,\mathrm{ierfc}\,\frac{x}{2\sqrt{at}}; \qquad (52)$$

здесь $\mathrm{ierfc}\,u=\int_u^\infty \mathrm{erfc}\,u\,du$ — функция, убывающая от 0,5642 при $u=0$ до нуля при $u=\infty$.

Температура контактного сечения для данного материала

$$T(0, t)=\frac{q_2\sqrt{t}}{\sqrt{\pi\lambda c\gamma}} \qquad (53)$$

возрастает пропорционально корню квадратному из t. Процесс нагрева стержней из малоуглеродистой стали при нагреве трением представлен изохронами и кривыми термического цикла (см. рис. 43). Очевидно, что для нагрева трением контактных плоскостей свариваемых стержней из металла с заданными свойствами до заданной температуры $T_к$, обеспечивающей качественную сварку, длительность нагрева $t_к$ обратно пропорциональна квадрату удельной мощности трения:

$$q_2^2 t_к=\pi\lambda c\gamma T_к^2=\mathrm{const}. \qquad (54)$$

Процесс выравнивания. Температуру в стадии выравнивания по окончании нагрева длительностью $t_к$ определим наложением по выражению (6) процессов теплонасыщения источника и стока тепла, представленных соотношением (52). Для контактного стержня без теплоотдачи температура в процессе выравнивания

$$T(0, t)=\frac{q_2}{\sqrt{\pi\lambda c\gamma}}\left(\sqrt{t}-\sqrt{t-t_к}\right);\quad t\geqslant t_к. \qquad (55)$$

Характеристики термического цикла контактного сечения: длительность нагрева выше T, меньшей, чем $T_к$; мгновенная скорость охлаждения v, °С/с, которую при данной T определяют из графика (рис. 44). При сварке металла с заданными свойствами и характерными температурами длительность нагрева $t_н$, как и общая длительность нагрева при сварке $t_к$, обратно пропорциональна квадрату удельной тепловой мощности q_2, а скорость охлаждения при данной температуре пропорциональна квадрату удельной мощности.

НАГРЕВ ДЕТАЛЕЙ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКЕ

Применение ультразвука для соединения материалов основано на возбуждении в зоне контакта упругих деформаций с ультразвуковой частотой. Диапазон используемых при ультразвуковой сварке частот составляет 18—80 кГц. При этом деформации металла могут достигать значений 10^{-2}—10^{-3}, амплитуды смещений — десятков микрон, а амплитуды скоростей — нескольких метров в секунду. Опытные данные показывают, что источники тепла, возникающие на контактных поверхностях соединяемых материалов при ультразвуковой сварке, обусловлены работой сил трения при перемещении изделий с малой амплитудой и большой частотой относительно друг друга.

Характеристики источников теплоты. Для схемы с продольно колеблющимся инструментом среднюю акустическую мощность за период колебаний в контактах инструмент — деталь и деталей между собой можно определить по следующим формулам [4]:

в контакте инструмент—деталь

$$q_{н.д}=\frac{1}{2}R_1 d_1\left[\omega\left(A_н-A_{в.д}\right)\right]^2=\frac{1}{2}\omega^3\left(A_н-A_{в.д}\right)\left(A_{в.д}m_{1пр}+A_{н.д}m_{2пр}\right); \qquad (56)$$

в контакте деталь—деталь (в зоне сварки)

$$q_{д.д}=\frac{1}{2}R_2 d_2\left[\omega\left(A_{в.д}-A_{н.д}\right)\right]^2=\frac{1}{2}\omega^3 A_{н.д}m_{2пр}\left(A_{в.д}-A_{н.д}\right); \qquad (57)$$

здесь R_1 и R_2 — эквивалентное сопротивление трению в первом и во втором контактах; d_1 и d_2 — площади контактов; ω — круговая частота; $A_н$, $A_{в.д}$ и $A_{н.д}$ — соответственно амплитуды колебаний инструмента, верхней и нижней деталей; $m_{1пр}$ и $m_{2пр}$ — приведенные массы деталей.

Таким образом, расчет мощности, выделяемой в контактах, сводится к определению амплитуды колебаний и их приведенных масс. Приведенная масса соответствует той части детали, в пределах которой амплитуда колебаний сохраняется постоянной. Амплитуды колебаний определяются экспериментально.

Расчет температуры в зоне сварки. При известных мощностях, выделяемых в контактах, можно при некоторых допущениях рассчитать температурное поле в зоне сварки. Если считать, что теплообмен между свариваемыми деталями осуществляется через площадь сварной точки, нижняя деталь вместе с опорой образует полубесконечное тело, а суммарный тепловой поток от источников в контактах деталей с инструментом и между собой, направленный в полубесконечное тело, является постоянным и равным $0{,}4q_1+0{,}65q_2$, где q_1 и q_2 — тепловые мощности источников соответственно в первом и втором контактах [соотношения (56) и (57)]. Расчет температуры в полубесконечном теле от действия источника теп-

лоты, распределенного по площади круга радиусом R, может быть выполнен с помощью соотношения

$$T(r, z, t)=\frac{Rq_2}{2\lambda}\int_0^\infty J_0(\xi r)\,J_1(\xi R)\left\{e^{-\xi z}\operatorname{erfc}\left[\frac{z}{2\sqrt{at}}-\xi(at)^{1/2}\right]-e^{\xi z}\operatorname{erfc}\times\right.$$
$$\left.\times\left[\frac{z}{2\sqrt{at}}+\xi(at)^{1/2}\right]\right\}\frac{d\xi}{\xi}, \quad (58)$$

где $J_0(u)$ и $J_1(u)$ — функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка соответственно.

Средняя температура в зоне сварки

$$T_{ср}(t)=\frac{1}{\pi R^2}\int_0^R T(r, 0, t)\,2\pi r\,dr. \quad (59)$$

Температура в точках по оси Z лежащих ниже зоны сварки,

$$T(0, z, t)=\frac{2q_2\sqrt{at}}{\lambda}\left[\operatorname{ierfc}\frac{z}{2\sqrt{at}}-\operatorname{ierfc}\frac{(z^2+R^2)^{1/2}}{2\sqrt{at}}\right]. \quad (60)$$

Сопоставление расчетной температуры с опытной показывает удовлетворительное совпадение их в период нагрева и определенное расхождение в стадии выравнивания температуры, что связано с дополнительным подводом тепла от разогретого наконечника инструмента. Расчет температуры по высоте наконечника можно выполнить по схеме нагрева полубесконечного стержня постоянно действующим равномерно распределенным по торцу стержня источником теплоты с удельной плотностью потока q_2:

$$T(z, t)=\frac{2q_2\sqrt{at}}{\lambda}\operatorname{ierfc}\frac{z}{2\sqrt{at}}. \quad (61)$$

Формулы (59)—(62) позволяют рассчитать максимальную температуру в зоне сварки.

РАСЧЕТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

При сварке взрывом (рис. 45) происходит образование физического контакта между соединяемыми поверхностями, а последующее электронное взаимодействие обеспечивает создание прочной металлической связи. Сближение поверхностей на расстояние, обеспечивающее физический контакт, осуществляется при сварке взрывом посредством совместной пластической деформации поверхностных слоев соединяемых материалов.

Расчетные методы определения режимов сварки взрывом основываются на положениях теории активации процесса соединения металлов в твердом состоянии. Для получения физического контакта скорость перемещения вдоль свариваемого соединения вершины угла встречи соударяющихся поверхностей $v_к$ должна быть меньше скорости распространения волн пластического сжатия c. В противном случае металл не успевает деформироваться, и сварка не происходит. Скорость волны пластической деформации приближенно определяется по формуле

$$c=(K/\gamma)^{1/2}; \quad (62)$$

здесь K — модуль объемного сжатия металла, кгс/см²; γ — плотность металла (кг/см³). Уменьшение $v_к$, как следует из опыта, приводит к повышению прочности соединений. Нижний предел возможного уменьшения $v_к$ составляет 1800—2000 м/с.

Металл в зоне соударения подвергается всестороннему неравномерному сжатию. Наличие свободной поверхности перед вершиной динамического угла встречи соударяющихся частей создает благоприятные условия для пластического течения в направлении процесса сварки. Давление на фронте пластической волны сжатия должно достигать определенной величины, зависящей от прочностных характеристик материала Необходимые минимальные давления должны примерно на порядок превышать предел текучести свариваемых металлов. Например, при сварке алюминия с алюминием давление $p=6300$ кгс/см², предел текучести $\sigma_т=300$ кгс/см²; при сварке меди с медью $p=24\,600$ кгс/см², $\sigma_т=1700$ кгс/см².

Величина среднего давления p, развивающегося в зоне соударения, зависит от скорости соударения свариваемых частей и физических свойств материала. Приближенно скорость соударения может быть рассчитана (для схемы рис. 45) с помощью соотношения

$$v=D\sqrt{1-\left(1-\frac{h\rho_{BB}}{4\delta\rho_в}\right)}, \quad (63)$$

где D — скорость детонации BB; h — расстояние между пластинами; ρ_{BB} — плотность BB; $\rho_в$ — плотность метаемой (верхней) пластины.

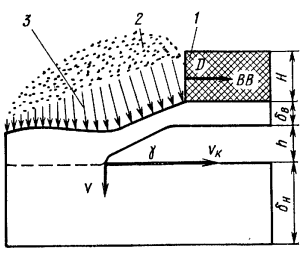


Рис. 45. Схема сварки взрывом параллельно расположенных пластин:
1 — фронт детонационной волны; *2* — фронт разлета продуктов взрыва BB; *3* — фронт волны разряжения; D — скорость детонации BB; v — скорость соударения пластин; $v_к$ — скорость перемещения «динамического угла встречи» соударяющихся пластин в направлении сварки; $\delta_в$ — толщина метаемой (верхней) пластины; $\delta_н$ — толщина неподвижной пластины

Зная v, можно с помощью ударных адиабат, построенных в координатах p—u (где u — массовая скорость частиц металла за фронтом ударной волны), определить p. Расчет v по формуле (63) дает значение, близкое к опытному, если h мало по сравнению с H (см. рис. 45).

При известных технологических параметрах сварки (h, H, D, ρ_{BB}), размерах и свойствах свариваемых металлов ($\delta_в$, $\rho_в$) можно рассчитать величины v и ρ или решить обратную задачу — подобрать по ним заряд BB и исходное расстояние между свариваемыми поверхностями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вилль В. И.** Сварка металлов трением. Л., «Машиностроение», 1970. 176 с.
2. **Гельман А. С.** Основы сварки давлением. М., «Машиностроение», 1970. 312 с.
3. **Коздоба Л. А.** Методы решения нелинейных задач теплопроводности. М., «Наука», 1975. 228 с.
4. **Кузнецов В. А., Лощилов В. И.** Ультразвуковая сварка металлов и пластмасс. М., «Машиностроение», 1972. 76 с.
5. **Лыков А. В.** Тепломассообмен. Справочник. М., «Энергия», 1972. 560 с.
6. **Рыкалин Н. Н.** Расчеты тепловых процессов при сварке. М., Машгиз, 1951. 296 с.
7. **Рыкалин Н. Н.** Расчеты тепловых процессов при сварке. Справочник по сварке, ч. II. М., Машгиз, 1960. 556 с.
8. **Рыкалин Н. Н.** Источники энергии для сварки. — «Сварочное производство», 1974, № 11, с. 52—57.
9. **Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Кокора А. Н.** Лазерная обработка материалов. М., «Машиностроение», 1975. 296 с.
10. **Седых В. С., Казак Н. Н.** Сварка взрывом и свойства сварных соединений. М., «Машиностроение», 1971. 72 с.
11. **Теоретические основы сварки.** Под ред. В. В. Фролова. М., «Высшая школа», 1970, 592 с. Авт: В. Н. Волченко, В. А. Винокуров, В. В. Фролов.
12. **Тепловые процессы при контактной сварке.** Сб. трудов лаборатории сварки металлов Институт металлургии им. А. А. Байкова АН СССР. Под ред. Н. Н. Рыкалина. М., Изд. АН СССР, 1959, 315 с.

Глава 3

МЕТАЛЛУРГИЯ СВАРКИ

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ ПРИ СВАРКЕ

При сварке без защиты расплавляемый металл интенсивно поглощает азот и кислород из воздуха, вследствие чего сварные швы характеризуются низкими механическими свойствами (табл. 1).

1. Характеристика металла сварного шва

Наименование показателей	Основной металл (сталь Ст3)	Металл шва при сварке проволокой Св-08А
Содержание кислорода, %	До 0,02	0,1—0,2
Содержание азота, %	0,04—0,08	0,1—0,2
Предел прочности, кгс/мм²	40—45	34—40
Относительное удлинение, %	25—30	5—10
Угол загиба, градусы	180	20—40
Ударная вязкость, кгс · м/см²	> 15	0,5—2,5

Для изоляции металла от воздуха в процессе сварки применяют различные средства защиты: электродные покрытия, флюсы, защитные газы, вакуум. Однако полностью изолировать металл от воздуха обычно не удается. Даже при сварке в вакууме парциальное давление азота и кислорода в камере может оказаться достаточным для взаимодействия с металлом.

Более того, средства защиты обычно сами способны взаимодействовать с металлом. Не являются исключением и инертные газы (аргон, гелий), которые могут содержать заметные количества азота, кислорода и водорода (влаги) и вызывать при соответствующих условиях протекание реакций между газом и металлом.

Протекание реакций при сварке приводит к изменению состава переплавляемого (обычно качественного) металла и, значит, к изменению его свойств. Возможно также образование в результате реакций пор неметаллических включений и других дефектов в металле шва. Поэтому знание закономерностей металлургических реакций при сварке имеет важное практическое значение, открывая пути для прогнозирования состава, а в конечном счете, и свойств металла шва.

Выделяют две основные зоны или стадии взаимодействия расплавленного металла с газами и шлаком: торец электрода с образующимися на нем каплями и сварочную ванну. В зависимости от условий взаимодействия (температуры, времени взаимодействия, межфазной поверхности, равновесных и исходных концентраций) на этих стадиях полнота протекания реакций и даже их направление могут быть различными.

Представление о роли отдельных стадий при сварке (наплавке в медную форму) на воздухе без защиты проволокой с различным содержанием углерода дают данные, приведенные в табл. 2. Окисление углерода (и марганца) на стадии ванны увеличивается с ростом содержания его в проволоке, так как, несмотря на большую скорость окисления углерода в каплях, в этом случае содержание его в металле, поступающем в ванну, оказывается заметно большим. Больше содержится также и марганца, окисление которого в каплях тормозится выгоранием углерода. В результате на стадии ванны система находится дальше от равновесия (больше исходные концентрации), и обе реакции протекают с бóльшей скоростью и полнотой. Роль стадии ванны также существенно увеличивается с уменьшением окислительной способности покрытия, так как при этом окислительные реакции на стадии капли протекают вяло и в ванну поступает металл с большим содержанием углерода и марганца, а при сварке с покрытием, содержащим марганцовую руду, на стадии ванны наблюдается даже восстановление части марганца, окислившегося на электроде (отрицательные потери приведенные в табл. 2).

2. Потери легирующих элементов в зависимости от содержания углерода в проволоке

Электродная проволока	Условия защиты	Элемент	Потери	
			общие, % от исходного содержания	на стадии ванны, % от общих потерь
Углеродистая (0,38% С; 0,63 %Mn)	Без защиты	С	60,5	4,0
		Mn	58,7	15,8
Углеродистая (0,90% С; 0,51% Mn)		С	42,0	33,4
		Mn	15,7	76,0
37ГС (0,4% С; 1,06% Mn; 1,2% Si)	Покрытие из гематита	С	87,5	8,6
		Mn	97	0
	Покрытие из 80% $CaCO_3$ и 20% CaF_2	С	40	25
		Mn	47,2	38,2
10Г2	Покрытие из 20% MnO; 45% SiO_2, 20% Al_2O_3	Mn	86	—3,5

Таким образом, с реакциями на стадии ванны приходится считаться тем в большей степени, чем в менее окислительных условиях ведется процесс сварки.

Кроме реакций на стадиях капли и ванны, в случае электродных покрытий и керамических флюсов, приходится считаться также с химическими реакциями, которые протекают между компонентами покрытий и флюсов при их изготовлении и нагреве в процессе сварки (до их расплавления). Наибольшее значение имеют реакции окисления металлических присадок, вводимых в шихту покрытий (флюсов). В качестве примера приведем данные об окислении марганца по стадиям для покрытия, состоящего из 35% мрамора, 35% плавикового шпата, 17,5% порошка металлического марганца (88,99% Mn) и 12,5% сухого остатка жидкого стекла:

Окисление	% от исходного содержания
В процессе изготовления электрода	10,5
В процессе нагрева покрытия (в твердом состоянии)	15,3
На стадии капли	21,2
И застревание в шлаке на стадии ванны	25,0
Всего потерь	72,0

Исходное содержание марганца на электроде составляло 10,4% от массы металла электродного стержня и металлической присадки в покрытии.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ПРОТЕКАНИЯ РЕАКЦИЙ ПРИ СВАРКЕ

Химическая термодинамика, опираясь на общие законы физических и химических явлений, независящие от их механизма, позволяет оценивать принципиальную возможность протекания реакции в данных условиях и ее вероятное направление и рассчитывать концентрации реагентов, отвечающие равновесию.

Решения уравнений термодинамики должны относиться к вполне определенной температуре, поэтому их применение к металлургическим процессам, осуществляемым обычно при температурах, изменяющихся во времени и в пространстве, связано с определенными трудностями. Особенно это относится к сварочным процессам, в которых вследствие локальности нагрева и малой массы расплавленного металла температурное поле весьма неравномерно и скорости изменения температуры велики.

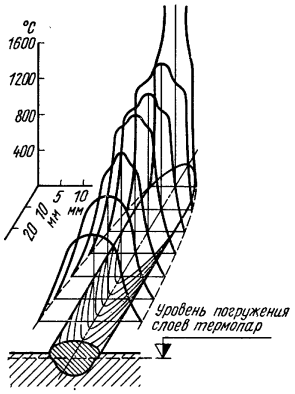


Рис. 1. Распределение температуры в сварочной ванне

Температура металла в зоне плавления. Характер температурного поля при дуговой сварке иллюстрируют данные о распределении температуры по длине и ширине ванны (рис. 1), полученные И. К. Походней и И. И. Фруминым с помощью термопар погружения, спаи которых находились на глубине 2 мм от поверхности ванны, при наплавке порошковой проволокой ПП-Х12ВФ под флюсом АН-30 на пластину из стали Х12Ф1 (ликвидус и солидус для этой стали составляют ~ 1320 и 1150° С соответственно).

Средняя энтальпия и температура ванны при дуговой сварке, определенная калориметрически по данным различных исследователей, характеризуется значительным превышением над точкой плавления. Перегрев составляет 100—500° С (табл. 3).

Средняя температура капель электродного металла, поступающих в ванну, увеличивается с увеличением силы тока и уменьшением диаметра электрода (рис. 2). Наибольшее значение (до 2700° С) было получено при сварке в инертных газах при струйном переносе металла.

Подобные же значения перегрева, усредненные по поверхности ванны, были получены при оценке температуры поверхности ванны по скорости испарения меди при нагреве ее дугой с вольфрамовым катодом. Так, при плавлении в графитовом тигле диаметром 40 мм мощной дугой перегрев достиг 600° С, а в медной водоохлаждаемой форме 300—500° С (И. И. Потапов Ф Н. Стрельцов).

При электрошлаковой сварке температура металла зависит от температуры шлаковой ванны. Шлак более всего разогрет вблизи электрода (в нижней его части) и между электродом и металлической ванной. Распределение температуры по глубине шлаковой ванны при общей ее глубине 40—45 мм характеризуется следующими данными (Г. А. Перцовский):

Глубина погружения термопары, мм	10	20	30
Температура, °С	1700—1800	1800—1980	1900—1950

Средняя энтальпия и температура металла при электрошлаковой сварке по результатам калориметрирования составляют соответственно 1870 Дж/г и 1790 °С.

3. Энтальпия и температура сварочной ванны

Свариваемый металл	Способ сварки*1	Средние значения		Перегрев над точкой плавления, °С
		Энтальпия ванны, Дж/г	Температура ванны, °С	
Низкоуглеродистая сталь $T_{пл}$ = 1525 °С; $\Delta H_{пл}$ = 1360 Дж/г	Ф	—	1705—1860 / 1768	240
	$А_п$	1450—1610	1625—1800	100—275
	$А_{нп}$	1480—1600	1665—1790	140—265
Алюминий $T_{пл}$ = 660 °С; $\Delta H_{пл}$ = 1140 Дж/г	$А_п$	1435—1700	1000—1245	340—585
	$А_{нп}$	1515—1670	1075—1215	415—555
Сталь Х12Ф1 $T_{пл}$ = 1310 °С	$П_п$	—	1500—1610 / 1570	260

*1 Ф — под флюсом; $А_п$ и $А_{нп}$ — аргонодуговая плавящимся и неплавящимся электродами; $П_п$ — порошковой проволокой ПП-Х12ВФ.

Примечание. В числителе указана минимальная и максимальная температура ванны, а в знаменателе — средняя.

Относительно большие размеры ванны при электрошлаковой сварке позволяют думать о несколько более равномерном распределении температуры в ней по сравнению с относительно небольшими ваннами дуговой сварки.

Выбор температуры при расчетах равновесий. Неравномерность температурного поля в зоне сварки весьма затрудняет выбор температуры, к которой следует

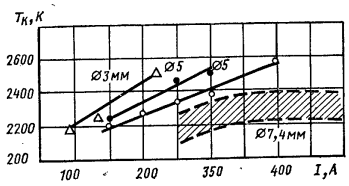


Рис. 2. Средняя температура капель в зависимости от силы тока и диаметра электрода. Голые электроды ⌀ 3 и 5 мм — постоянный ток прямой (Δ, О) и обратной (●) полярности; покрытые электроды ⌀ 7,4 мм — переменный ток

относить расчеты равновесия. Любая порция расплавляемого металла, как электродного, так и основного, проходит за короткое время термический цикл, начинающийся с быстрого нагрева до максимальной температуры и последующего охлаждения; соответственно изменяются равновесные концентрации.

В этих условиях термодинамические расчеты можно вести лишь условно, разбив зону сварки на участки и принимая для каждого участка какую-либо одну температуру за равновесную. Практически удобно вести расчеты для двух стадий: стадии электрода (капли) и стадии ванны, выбирая за равновесную для каждой из них, например, среднюю температуру металла. Исходные концентрации реагентов при этом, естественно, будут разными для каждой стадии.

Такого рода расчеты позволяют приближенно оценить возможность протекания той или другой реакции и ее вероятное направление по величине стандартного изменения свободной энергии. Заметим, что немалые трудности при этом вызывает недостаточность термодинамических данных (активностей, температурных функций констант равновесия и др.) для многих сварочных систем.

Большие сложности возникают при оценке равновесных концентраций.

Рассмотрим хорошо изученную металлургами реакцию окисления-восстановления марганца

$$[Mn] + (FeO) \rightleftarrows (MnO) + [Fe];$$

$$K_{Mn} = \frac{a_{MnO} a_{Fe}}{a_{Mn} a_{FeO}}.$$

На рис. 3 представлены экспериментальные данные, полученные при сварке под высокомарганцовистым силикатным флюсом при разной исходной концентрации марганца (*1*). Фактическое содержание марганца совпадает с исходным лишь в точке *A*, левее которой происходит восстановление марганца из флюса, правее — его окисление. Примем точку *A* за равновесную и, пренебрегая небольшим изменением состава шлака при изменении исходной концентрации, проведем кривую равновесных концентраций (*3*) через эту точку параллельно оси абсцисс. Нетрудно видеть, что система везде стремится к равновесию, но не доходит до него (кроме точки *A*).

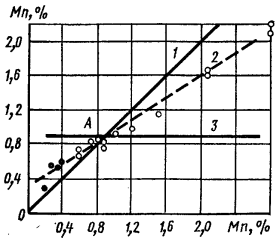


Рис. 3. Сравнение исходной и равновесной концентраций марганца с его действительным содержанием в шве при сварке под флюсом типа ОСЦ-45:

1 — исходная; *2* — фактическая; *3* — равновесная концентрации

Для небольших концентраций марганца в расплаве железа $a_{Mn} = [Mn]$ и $a_{Fe} = 1$. Пренебрегая незначительной разницей в значениях K_{Mn} при переходе от мольных долей к % по массе, получим

$$\frac{1}{100} K_{Mn} = K'_{Mn} = \frac{(\%MnO)\,\gamma_{MnO}}{[\%Mn]\,(\%FeO)\,\gamma_{FeO}}.$$

Точке равновесия (0,9% Mn) отвечает по данным анализа состав шлака: 44% MnO; 4,4% FeO; 51,6% SiO_2. Отношение коэффициентов активностей $\gamma_{FeO}/\gamma_{MnO} = 6{,}15$. Таким образом,

$$K'_{Mn} = \frac{44{,}0}{0{,}9 \cdot 4{,}4 \cdot 6{,}15} = 1{,}8.$$

Температурная функция константы равновесия

$$\lg K'_{Mn} = \frac{6\,600}{T} - 3{,}16.$$

Следовательно, значению $K'_{Mn} = 1{,}8$ соответствует равновесная температура $T_р \approx 1930$ К.

Заметим, что приведенный расчет справедлив лишь для точки *A*, где мы можем полагать наличие равновесия. При других исходных концентрациях система не доходит до равновесия и подстановка соответствующих им экспериментальных данных в уравнение константы равновесия неправомерна. Оценка равновесий в системе металл — газ дополнительно затрудняется активацией газовых

частиц в дуге, что не позволяет пользоваться известными для обычных условий нагрева значениями констант равновесия.

Экспериментальное определение равновесных концентраций. Наличие равновесия в системе можно оценить не только по совпадению исходной и фактической концентраций при подходе к точке равновесия с разных сторон, но и по кинетическим кривым. Такие кривые для реакции абсорбции азота жидким ниобием, полученные на неподвижной, образованной в медной изложнице стационарной ванне, обрабатываемой аргоно-азотной дуговой плазмой, показаны на рис. 4. Участки насыщения на этих кривых дают представление о равновесии металла ванны с дуговой плазмой. Однако неизотермические условия процесса не позволяют отнести найденные таким образом значения равновесных концентраций к какой-либо температуре. Тепловые условия в зоне сварки зависят от теплоотвода, концентрации теплового потока и т. п. На температурные условия влияет и содержание азота в дуге. Поэтому равновесные концентрации азота при разном его содержании в дуге должны быть отнесены к разным температурам. Кроме того, они зависят от степени однородности (в тепловом и концентрационном отношении) поверхности ванны, т. е. являются не истинными равновесными, а некоторыми условными концентрациями. Тем не менее с этими оговорками они могут быть использованы при различных металлургических расчетах.

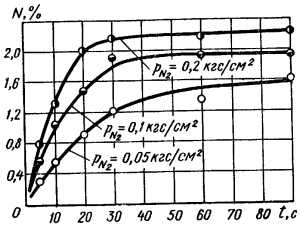


Рис. 4. Кинетика поглощения азота из дуговой плазмы сплавом ниобия с 3% Zr

Влияние относительной массы шлака на равновесную концентрацию. Относительная масса шлака, образующегося при плавлении покрытия, флюса или сердечника порошковой проволоки при сварке, во много раз больше, чем в обычных металлургических процессах. Поэтому возникает необходимость учитывать влияние массы шлака на равновесную концентрацию. Это влияние для металлической фазы описывается выражением [1]

$$c'_р = \frac{c'_{Me} + \chi c''_{Me}}{1 + \chi L}, \qquad (1)$$

где c'_{Me} и c''_{Me} — исходные концентрации элемента Me в металле и шлаке; χ — относительная масса шлака; L — коэффициент распределения элемента Me между шлаком и металлом.

Для шлаковой фазы, очевидно,

$$c''_р = L c'_р.$$

Относительная масса шлака χ будет оказывать на величину $c'_р$ наибольшее влияние в двух случаях: при малых значениях c'_{Me} и L, когда $c'_р \approx \chi c''_{Me}$, и при малом c''_{Me} и достаточно большом L, когда $c'_р \approx c'_{Me}/\chi L$.

КИНЕТИКА РЕАКЦИЙ ПРИ СВАРКЕ

Реакции при сварке обычно не успевают дойти до равновесия, и конечное содержание участвующих в реакциях веществ определяется прежде всего кинетикой реакций.

Кинетика реакций при сварке вполне удовлетворительно описывается уравнениями реакций первого порядка, а скорость реакций лимитируется массопереносом.

Общий вид кинетического уравнения. Система металл — газ — шлак при сварке не является закрытой системой с постоянной массой взаимодействующих веществ. В нее поступают реагирующие элементы с расплавляемым металлом и шлаком; происходит обмен с металлом и окружающей средой (шлаком и потоком газов), реагирующие элементы непрерывно удаляются из системы с затвердевающим металлом. При этом объем металла и шлака, вообще говоря, меняется, стабилизируясь лишь в квазистационарном состоянии.

Для такой открытой системы скорость изменения концентрации x какого-либо элемента в металле до установления квазистационарного состояния может быть представлена уравнением

$$\frac{d}{dt}(\rho V x) = g c_0 + \beta\rho F (c_p - x) - g_{кр} x, \qquad (2)$$

где ρ и V — плотность и объем расплава; c_0 и c_p — начальная и равновесная концентрации элемента; g и $g_{кр}$ — массовые скорости плавления и затвердевания металла; F — межфазовая поверхность, на которой протекает реакция; β — коэффициент массопереноса.

Второй член правой части уравнения (2) учитывает протекание реакции, скорость которой лимитируется переносом элемента в металлической фазе.

Однако при окислении примесей металла кислородом газовой (или шлаковой) фазы при достаточно большой концентрации элемента в металле скорость реакции определяется подводом кислорода к поверхности металла и не зависит от x. В этом случае второй член уравнения (2) должен быть заменен потоком окисляемого элемента, зависящим только от условий доставки кислорода:

$$j_{Me} = r j_0 = r\beta_0 \rho_{газа} c_0,$$

где r — стехиометрический коэффициент; j_0 — поток кислорода, затрачиваемого на окисление данного элемента; β_0 — коэффициент массопереноса; c_0 — концентрация кислорода.

В результате уравнение (2) получает вид

$$\frac{d}{dt}(\rho V x) = g c_0 - r\beta_0 \rho_{газа} c_0 F - g_{кр} x. \qquad (3)$$

Но по мере течения реакции концентрация окисляемого элемента в металлической фазе уменьшается, соответственно уменьшаются возможности диффузионного переноса и, начиная с некоторого критического значения x^*, поток элемента в металле оказывается не в состоянии обеспечить участие в реакции всего подводимого кислорода. С этого момента скорость реакции начинает лимитироваться подводом окисляемого элемента и зависит от его концентрации.

Реакции на торце электрода протекают в условиях капельного плавления металла. Необходимо поэтому учитывать периодический характер процесса, непрерывное увеличение объема массы капли в границах одного периода и неполный переход металла капли с электрода. Остающийся металл (доля которого от всей массы жидкого металла на торце в момент перед отделением от него капли характеризуется величиной μ) продолжает участвовать во взаимодействии. Кроме того, нужно помнить, что на электроде не происходит затвердевания металла, т. е. $g_{кр} = 0$.

С учетом сказанного было выведено уравнение, описывающее изменение содержания элемента в отделяющихся каплях в зависимости от числа переходов. При достаточно большом числе переходов ($n \to \infty$) расчет приводит к выражению

$$c_к = c_p \left[1 - \frac{(1-\mu)\,[1 - \exp(-\beta s \tau)]}{\beta s \tau\,[1 - \mu \exp(-\beta s \tau)]}\right], \qquad (4)$$

где $c_к$ — содержание элемента в каплях, отделяющихся от электрода; c_p — равновесная концентрация; β — коэффициент массопереноса; s — удельная поверхность (отношение F/V); τ — время перехода ($\tau = 1/N$, где N — частота перехода капель).

Время перехода можно выразить через массовую скорость плавления электрода $g_э$. После преобразований выражение (4) получает вид

$$c_к = c_p - (c_p - c_0)\frac{1 - \exp\left[-(1-\mu)\frac{A}{g_э}\right]}{\frac{A}{g_э}\left\{1 - \mu \exp\left[-(1-\mu)\frac{A}{g_э}\right]\right\}}, \qquad (5)$$

где $A = \beta\rho F$.

Расчеты показывают, что постоянный состав капель устанавливается весьма быстро [1].

Анализ выражения (5) при $c_0 = 0$ показывает, что отношение $c_к/c_p$, характеризующее степень приближения системы к равновесию, уменьшается с увеличением $g_э$ и с уменьшением потока вещества A (рис. 5). Влияние μ при этом проявляется слабее, как это можно видеть из сравнения рис. 5, *а* и 5, *б*.

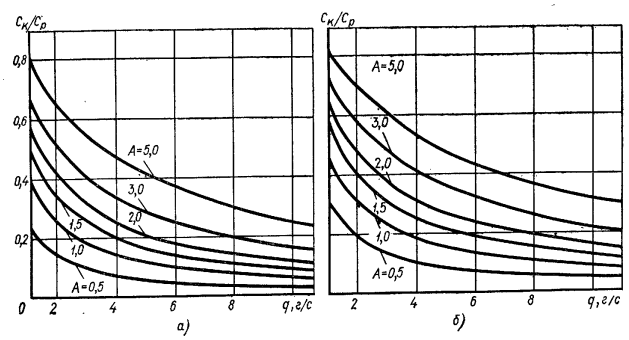


Рис. 5. Влияние скорости плавления электрода $g_э$ и параметра A на величину отношения $c_к/c_p$ при $\mu = 0{,}3$ (*а*) и $\mu = 0{,}8$ (*б*)

Значения μ могут колебаться в широких пределах. Так, при сварке электродами без покрытия $\mu = 0{,}6 \div 0\,8$, а для покрытых электродов (АНО-4, ЦМ7 и др.) были получены значения $\mu = 0{,}2 \div 0{,}5$. При сварке под флюсом доля остающегося на электроде жидкого металла, по некоторым данным, еще меньше.

Время перехода τ зависит от режима сварки и вида процесса и составляет от нескольких миллисекунд при сварке в аргоне и в углекислом газе тонкой проволокой до нескольких десятых секунд при сварке покрытыми электродами. Меньше сведений об удельной поверхности (F/V) металла капель.

По данным кинограмм сварки голой проволокой без защиты удельная поверхность колеблется в пределах 15—30 $см^{-1}$. Для покрытых электродов, по данным работы [2] о массе переносимых капель, принимая каплю за сферу, получим, что $F/V = 9 \div 12$ $см^{-1}$. В действительности форма висящей капли отлична от формы шара; учитывая, кроме того, остающуюся на электроде часть капли, найдем, что удельная поверхность металла должна быть больше 9—12 $см^{-1}$.

Реакции в неподвижной (стационарной) ванне. Для неподвижной ванны, образованной в медной изложнице, имеющей постоянный объем и стационарной в

тепловом отношении ($g = g_{кр} = 0$ и $V = \text{const}$), получаем из уравнения (2) простое выражение

$$\frac{dx}{dt} = \beta \frac{F}{V}(c_p - x) = k(c_p - x), \quad (6)$$

интегрирование которого при начальном условии $t = 0$; $x = c_0$ дает

$$x = c_p - (c_p - c_0)e^{-kt}, \quad (7)$$

где k — константа скорости реакции.

Выражение (7) используют для экспериментального определения c_p, k и β: образец расплавляют в медной изложнице в нейтральной среде (в аргоне), при этом реакция происходит в результате подачи реагента (с газом или шлаком) после установления теплового равновесия в ванне.

Реакции в движущейся ванне. Процесс описывается уравнением (2) или (3) для односторонней реакции.

В случае обменной реакции, например для реакции обмена между металлом и шлаком, уравнения должны быть написаны отдельно для металлической и шлаковой фаз и решены совместно.

Решение, полученное с помощью некоторых упрощающих предположений о кинетике образования металлической и шлаковой ванн и с учетом влияния относительной массы шлака на равновесные концентрации, дает следующие выражения для текущих концентраций элемента в металле:

$$x' = \frac{1}{1 - e^{-\varkappa t}}\left[b_1 - b_2 e^{-\varkappa t} + b_3 e^{-(\varkappa + \beta' s)t}\right], \quad (8)$$

где

$$b_1 = \frac{\beta' s (c_0' + \chi c_0'') + \varkappa c_0' (1 + \chi L)}{(1 + \chi L)(\varkappa + \beta' s)};$$

$$b_2 = \frac{c_0' + \chi c_0''}{1 + \chi L};$$

$$b_3 = \frac{\varkappa\chi (c_0' L - c_0'')}{(1 + \chi L)(\varkappa + \beta' s)};$$

$$\varkappa = \frac{g_{кр}'}{\rho' V'};$$

L — коэффициент распределения элемента между шлаком и металлом ($L = c_p''/c_p'$). Остальные обозначения те же, что и в уравнении (2). При этом величины, относящиеся к металлу, обозначены одним штрихом, а к шлаку — двумя.

Текущая концентрация элемента в шлаке будет, очевидно, равна

$$x'' = c_0'' + \frac{1}{\chi}(c_0' - x'). \quad (9)$$

Определение значений параметров, входящих в кинетические уравнения, встречает значительные трудности. Объем ванны V может быть найден при известной ее массе по формуле [1]

$$V = \frac{G}{\rho_ж}.$$

Сложнее обстоит дело с выбором значений поверхности ванны, так как в уравнения надо вводить величину не всей поверхности ванны, а лишь части ее участвующей во взаимодействии. Так, при взаимодействии металла со шлаком

в расчет следует брать только покрытую шлаком часть поверхности ванны. Кроме того, нужно учитывать, что в хвостовой части ванны протекание реакций замедляется охлаждением металла. Поэтому в ряде случаев поверхность хвостовой части следует исключать из расчета.

Весьма мало данных о коэффициентах массопереноса. Значения β зависят от температурной обстановки в ванне, условий перемешивания металла, диффузионной подвижности элемента и других факторов. В опытах были получены значения $\beta = 0{,}03 \div 0{,}25$ см/с.

Трудности в выборе значений равновесной концентрации были отмечены ранее (см. с. 66).

РАСЧЕТНЫЕ ОЦЕНКИ СОСТАВА МЕТАЛЛА ШВА

Исходные данные. При металлургических расчетах сварки используют следующие основные величины, характеризующие состав металла на разных участках и стадиях его обработки и определяемые химическим анализом или расчетом: содержание элемента в основном металле c_0; в каплях, отделяющихся от электрода, $c_к$; на электроде $c_э$, в наплавленном металле (наплавка в медную форму или верхние слои многослойной наплавки) $c_н$ и в металле шва $c_ш$.

Величина $c_э$ при сварке голой проволокой в защитных газах, под плавленым флюсом и при электрошлаковой сварке совпадает с содержанием элемента в проволоке $c_{пр}$. Однако при сварке покрытыми электродами, под керамическим флюсом и порошковой проволокой в величину $c_э$ входит также содержание вводимых в эти материалы металлических присадок:

$$c_э = c_{пр} + k_п c_п, \quad (10)$$

где $k_п$ — относительная масса покрытия (сердечника, расплавленного флюса); $c_п$ — содержание элемента в покрытии (сердечнике или флюсе).

При введении металлических материалов (в виде порошка или дополнительной присадочной проволоки) непосредственно в зону сварки (в ванну) количество присадки также должно относиться к электродной проволоке. В этом случае

$$c_э = c_{пр} + c_п \frac{g_{прис}}{g_{пров}}, \quad (10')$$

где $c_п$ — содержание элемента в присадке; $g_{прис}$ и $g_{пров}$ — массовые скорости плавления присадки и проволоки.

Сравнивая исходное содержание элемента с содержанием его в наплавленном металле (или в металле шва), следует помнить, что концентрация $c_э$ отнесена к массе проволоки, а концентрации $c_н$ — к массе наплавленного металла и они могут различаться в результате потерь металла или перехода в наплавку присадок из электрода или флюса. Если разницей в массе исходного и полученного при сварке металла пренебречь нельзя, следует сравниваемые концентрации привести к одной массе, например к массе наплавленного металла. Соотношение между ними эквивалентно соотношению между скоростями наплавления металла $g_н$ и расплавления электродной проволоки и металлических присадок $g_э$:

$$\frac{g_н}{g_э} = (1 - \psi), \quad (11)$$

где $g_э = g_{пров}(1 + k_п p_1)$; p_1 — металлические присадки, %; $k_п$ — масса шихты покрытия, сердечника или расплавленного флюса, куда введены присадки, отнесенные к массе проволоки; ψ — отношение полных потерь металла (разность между расплавленным металлом проволоки плюс присадки и наплавленным металлом) ко всему расплавленному металлу.

Относительная масса покрытия или флюса (обозначаемая часто $k_ф$) определяется как отношение массы покрытия к массе проволоки на каком-либо отрезке

покрытого электрода или массы расплавленного флюса, приходящегося на единицу длины расплавленной проволоки и отнесенной к ее массе. В случае порошковой проволоки отношение массы сердечника к массе оболочки $k_п$ связано с часто применяемым коэффициентом заполнения $k_э$ (отношением массы сердечника к массе порошковой проволоки) следующим выражением:

$$k_п = k_э/(1-k_э). \quad (12)$$

Коэффициент перехода (коэффициент усвоения) какого-либо элемента, представляющий собой отношение конечной его концентрации к исходной, следует, учитывая сказанное, подсчитывать по выражению

$$\eta = \frac{c_н g_н}{c_э g_э} = \frac{c_н}{c_э}(1-\psi) \quad \text{или} \quad \eta = c_н \frac{(1-\psi)}{c_{пр} + k_п c_п}. \quad (13)$$

В зависимости от величины p_i, ψ, $c_п$ выражение (13) может быть упрощено [1].

Расчеты при отсутствии химических реакций. Металл шва в общем случае при сварке плавящимся электродом или при применении металлических присадок (проволоки, порошка и т. п.) образуется в результате перемешивания в ванне основного и электродного (присадочного) металла.

При отсутствии химических реакций или других причин (например, избирательного испарения) для изменения состава металла в процессе сварки содержание $c_ш$ любого элемента в металле шва может быть найдено по правилу смешения по известной доле Θ основного металла в шве:

$$c_ш = c_0\Theta + c_э(1-\Theta), \quad (14)$$

где c_0 и $c_э$ — исходное содержание элемента в основном и электродном металле. Доля основного металла в шве зависит от конструкции соединения, режима сварки и других причин (табл. 4) и может быть определена по отношению площади, занятой основным металлом в поперечном сечении шва, ко всей его площади:

$$\Theta = \frac{F_0}{F_э + F_0}, \quad (15)$$

где F_0 и $F_э$ — площади, занятые основным и электродным (присадочным) металлом соответственно.

Величину Θ можно регулировать, изменяя соотношение скоростей плавления электродного и основного металла. Так, для уменьшения Θ можно применять электроды и режимы, обеспечивающие высокий коэффициент наплавки и тем самым увеличивающие долю электродного металла, или повышать скорость сварки, применять колебательные движения электродом, с тем чтобы уменьшить проплавление основного металла.

Расчеты, основанные на данных о кинетике и термодинамике реакций. В большинстве случаев состав переплавляемого металла при сварке изменяется, что может быть определено с помощью кинетических уравнений (2)—(9).

Наибольшее практическое значение имеет квазистационарное состояние сварочной ванны. Расчетные уравнения для квазистационарного состояния могут быть получены из кинетических уравнений при $t \to \infty$ или при $\frac{d}{dt}(\rho V x) = 0$ и $g = g_{кр}$.

Содержание какого-либо элемента в ванне при этом будет

$$c_в = \frac{c_0 g + \beta\rho F c_р}{g + \beta\rho F}, \quad (16)$$

а с учетом коэффициента распределения элемента между твердой и жидкой фазами (коэффициента ликвации $k' = c/c_ж$),

$$c_в = \frac{c_0 g + \beta\rho F c_р}{k' g + \beta\rho F}. \quad (16')$$

4. Доля основного металла в шве

Вид соединения	Сталь*1	Вид сварки			
		Покрытыми электродами	Под флюсом	Электрошлаковая	Наплавка ленточным электродом
Наплавка валиков	П	0,15—0,40	0,25—0,50	—	0,08—0,20
	А	0,25—0,50	0,35—0,50		0,15—0,25
Стык без разделки кромок	П	0,30—0,50	0,35—0,55	0,2—0,4	—
	А	—		0,3—0,5	
Стык с разделкой кромок (однослойный шов)	П	0,20—0,40	0,25—0,50	—	
	А	0,30—0,50	0,40—0,60		
Корневые швы стыковых многослойных соединений	П	0,25—0,50	0,35—0,60		
	А	0,35—0,50	0,40—0,70		

*1 П — перлитная; А — аустенитная.

Влияние относительной массы шлака χ на $c_в$ учитывается здесь тем, что равновесная концентрация $c_р$ согласно выражению (1) зависит от χ.

Выражения (16) и (16′) справедливы для сварки с неплавящимся электродом. В случае плавящегося электрода необходимо учитывать плавление как основного, так и электродного металла. Выражение (16′) примет вид

$$c_в = \frac{c_0 g_0 + c_к g_н + \beta\rho F c_р}{k'(g_0 + g_н) + \beta\rho F}, \quad (17)$$

где g_0 и $g_н$ — массовые скорости плавлений основного и электродного металла с учетом потерь последнего на окисление и разбрызгивание; c_0 и $c_к$ — содержание элемента в основном металле и в поступающих в ванну каплях электродного металла. Величину c_0 берут по данным о составе основного металла, а $c_к$ рассчитывают по выражению (5).

Скорость плавления электродного металла берут по скорости подачи проволоки либо по коэффициенту наплавки $\alpha_н^{*1}$ ($g_н = \alpha_н I$). Скорость плавления основного металла g_0 находят из выражения

$$g_0 = \rho F_{пр} v_{св}, \quad (18)$$

где $F_{пр}$ — площадь зоны плавления; $v_{св}$ — скорость сварки.

Уравнение (16′) удобно представить в безразмерном виде:

$$\frac{c_в}{c_р} = \frac{\frac{c_к}{c_р} + \frac{\beta\rho F}{g}}{k' + \frac{\beta\rho F}{g}}, \quad (19)$$

*1 Здесь коэффициент наплавки, а не расплавления, так как в ванну поступает с электрода металл за вычетом потерь на угар, испарение и разбрызгивание и с добавками металлических присадок, вводимых в покрытие.

где $c_в/c_р$ характеризует полноту протекания реакции, а отношение $c_к/c_р$ — расстояние системы от равновесия на стадии ванны.

Рассматривая процесс в целом, т. е. объединяя стадии капли и ванны, получим

$$\frac{c_в}{c_0'} = \frac{1+\dfrac{\beta\rho F}{g'}\dfrac{c_р}{c_0'}}{k'+\dfrac{\beta\rho F}{g'}}, \qquad (20)$$

где $g' = g_0 + g_н$ представляет собой сумму скоростей плавления основного и наплавления электродного металла, а c_0' — гипотетическая исходная концентрация с учетом смещения расплавленного основного металла и капель электродного металла:

$$c_0' = \frac{c_0 g_0 + c_к g_н}{g_0 + g_н},$$

или, используя представление о доле основного металла в шве (ванне),

$$c_0' = c_0\Theta + c_к(1-\Theta). \qquad (14')$$

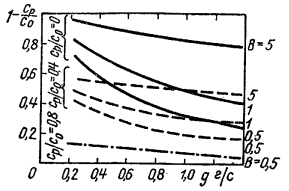


Рис. 6. Влияние скорости плавления g, отношения $c_р/c_0$ и произведения $\beta\rho F = B$ на изменение содержания элемента в процессе сварки

Из выражения (20), принимая для простоты расчетов $k' = 1$, получим, что относительное изменение содержания элемента в процессе сварки равно

$$1-\frac{c_в}{c_0'} = \frac{\left(1-\dfrac{c_р}{c_0'}\right)\dfrac{\beta\rho F}{g'}}{1+\dfrac{\beta\rho F}{g'}} \qquad (21)$$

и зависит от отношения $c_р/c_0'$ и безразмерного комплекса $\dfrac{\beta\rho F}{g'}$, представляющего собой отношение скорости поступления реагента к скорости плавления металла.

Нетрудно видеть, что величина $1-\dfrac{c_р}{c_0'}$ будет уменьшаться с увеличением скорости плавления g' и тем больше, чем меньше $c_р/c_0'$, т. е. чем дальше система находилась от равновесия в начальный момент. Также действует уменьшение потока вещества $\beta\rho F$ (рис. 6). Минимальное изменение состава металла при сварке, т. е. минимальное значение величины $1 - c_в/c_0'$, будет наблюдаться при больших скоростях плавления и малых значениях $\beta\rho F$ и отношения $c_р/c_0'$ (т. е. при небольших расстояниях системы от равновесия).

К сожалению, расчеты по приведенным выше уравнениям затрудняются, как указывалось, из-за отсутствия или крайней ограниченности сведений о величине параметров, входящих в эти уравнения (μ, τ, β, $c_р$, F, k'). Поэтому на практике часто пользуются другими способами, которые рассмотрим ниже.

Расчеты по известному составу наплавленного металла. Если выполнить шов (наплавку) в медную форму, т. е. без участия основного металла, то состав такого металла, часто называемого наплавленным металлом, покажет, какие изменения протекают в результате реакций как на торце электрода, так и в ванне. Обозначим $c_н$ содержание какого-либо элемента в наплавленном металле. Тогда содержание его в шве $c_ш$ (при сварке с участием основного металла), если все изменения в химическом составе металла отнести к электродному металлу, пренебрегая участием в реакциях основного металла, можно найти (по правилу смешения)

$$c_ш = c_0\Theta + c_н(1-\Theta).$$

В действительности участие основного металла в реакциях в ванне может изменить конечные результаты. Однако влияние основного металла обычно невелико, и расчеты по наплавленному металлу позволяют судить о возможном составе шва. Расчеты удобны тем, что значения $c_н$ могут быть найдены сравнительно просто из опыта путем наплавки в медную форму; они, как правило, приводятся в ТУ и паспортах на электроды и порошковую проволоку.

Расчеты по коэффициентам перехода. Другим способом оценки состава металла шва является расчет по коэффициентам перехода.

Пользуясь выражениями (13) и (14'), можно написать

$$c_ш = c_0\Theta + \eta c_э\frac{1-\Theta}{1-\psi}. \qquad (22)$$

Однако, поскольку коэффициенты перехода обычно определяются как $c_н/c_э = \eta$ без учета ψ,

$$c_ш = c_0\Theta + \eta c_э(1-\Theta), \qquad (22')$$

где $c_э$ — концентрация элемента в электроде, включая металлические присадки. Определив исходную концентрацию элемента и зная коэффициент перехода, можно, пользуясь выражением (22), найти его концентрацию в металле шва. Значения коэффициентов перехода для некоторых случаев сварки приведены в табл. 5 по данным разных авторов.

5. Коэффициенты перехода

Вид сварки	Коэффициенты перехода по элементам			
	C	Mn	Si	Cr
Сварка на воздухе без защиты: проволокой Св-08А	0,3—0,4	0,39—0,56	—	
проволокой Св-18ХГСА	0,29—0,34	0,63—0,69	0,5—0,87	0,90—0,95
Сварка в CO_2: проволокой 12Х18Н9Т	—	0,78	0,78	0,94
проволокой Св-18ХГСА	0,79	0,80	0,81	
проволокой 10ГС	0,71	0,55	0,37	—
Сварка в аргоне + 5% O_2: проволокой Св-18ХГСА	0,60	0,69	0,71	0,92
проволокой Св-10ГС	0,59	0,41	0,32	—
Сварка электродами УОНИ-13/45	—	0,45—0,55	0,14—0,27	

Коэффициенты перехода зависят от многих факторов: режима сварки, способа ввода легирующих элементов, окислительных условий в зоне сварки и др. Они больше могут служить характеристикой металлургических условий, существующих в данном конкретном случае сварки, чем средством прогнозирования состава шва.

Так, при одной и той же исходной концентрации легирующего элемента переход его будет существенно меньше, если он вводится в покрытие (флюс), а не в проволоку, или в случае более окислительных условий в зоне сварки, например в результате уменьшения количества раскислителей в проволоке или в покрытии.

Так, например, коэффициенты перехода марганца существенно увеличивались при введении в покрытие ферросилиция, обладающего бо́льшим сродством к кислороду, чем марганец, и играющего по отношению к нему защитную роль.

Содержание ферросилиция, %	5	10	20
Коэффициент перехода марганца	0,39	0,72	0,85

Изменения в составе многослойного металла по слоям (по высоте шва). При многослойной сварке состав металла шва, вообще говоря, изменяется от слоя к слою в связи с изменением степени разбавления его основным металлом (состав поступающих в ванну капель и основного металла обычно различен в той или другой степени) и суммирования результатов химических реакций, протекающих в ванне.

6. Значения ϑ в зависимости от Θ

Порядковый номер слоя	Отношение ϑ (%) при Θ				Порядковый номер слоя	Отношение ϑ (%) при Θ			
	0,3	0,4	0,5	0,6		0,3	0,4	0,5	0,6
2	9,00	16,00	25,00	36,00	6			1,56	4,66
3	2,70	6,40	12,50	21,60	7			0,78	2,80
4	0,87	2,56	6,25	12,96	8				1,68
5		1,02	3,12	7,77	9				1,01

Если принять, что доля основного металла (металла предыдущего слоя) остается постоянной (Θ = const) и пренебречь реакциями в ванне, то содержание элемента в n-м слое представится в виде

$$c_{ш,\,n} = c_к - (c_к - c_0)\,\Theta^n, \qquad (23)$$

где $c_к$ — содержание элементов в каплях или в наплавке в медную форму; $c_к \approx \approx c_н$.

Отсюда легко можно найти число слоев n, при котором обеспечивается любое заданное значение отношения $(c_к - c_{ш,\,n})/(c_к - c_0) = \vartheta$. Даже в наименее благоприятном случае при $c_0 = 0$, когда разность $c_к - c_0$ имеет максимальную величину, малые значения ϑ достигаются при весьма небольшом n (табл. 6).

В предположении Θ = const и с учетом изменения содержания элемента Δ

7. Изменение состава шва по высоте

Расстояние от низа шва, мм	Si, %	P, %
10	0,59	0,019
30	0,67	0,023
50	0,67	0,025
70	0,69	0,025
90	0,73	0,027
110	0,74	0,028

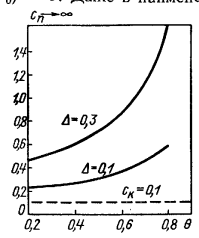


Рис. 7. Влияние доли θ участия металла предыдущего слоя в шве и изменения Δ содержания элемента в ванне на его предельное содержание в верхних слоях при $c_0 = 0$ и $c_к = 0{,}1\%$

в результате реакций в ванне (например, перехода кремния или серы из шлака при сварке покрытыми электродами или под флюсом), используя выражение (23) для исходного содержания элемента в ванне, для первого слоя получим

$$c_1 = c_0\Theta + c_к\,(1-\Theta) + \Delta = c_к - (c_к - c_0)\,\Theta + \Delta,$$

для второго слоя

$$c_2 = c_к - (c_к - c_0)\,\Theta^2 + \Delta\,(1+\Theta)$$

и для n-го слоя

$$c_n = c_к - (c_к - c_0)\,\Theta^n + \Delta\,(1+\Theta+\Theta^2+\ldots+\Theta^{n-1}).$$

Выражение в скобках в последнем члене представляет сумму убывающей прогрессии ($\Theta < 1$) со знаменателем Θ. При $n \to \infty$, $S = 1/(1-\Theta)$ и $\Theta^n \to 0$ выражение для n-го слоя принимает вид

$$c_{n\to\infty} = c_к + \frac{\Delta}{1-\Theta}. \qquad (24)$$

Этот предел достигается быстро, но может составлять заметную величину по сравнению с исходной концентрацией, как это иллюстрирует рис. 7, построенный для значения $c_к = 0{,}1$. В качестве примера в табл. 7 приведены данные по содержанию кремния и фосфора при многослойной сварке стали 16ГНМ (0,33% Si; 0,012% P) проволокой Св-10НМ (0,28% Si; 0,01% P) под флюсом ФЦ-6.

Однако постоянство Θ при многослойной сварке, особенно при сварке в разделку, обычно не соблюдается. Наибольшее значение Θ имеет в корневом шве и уменьшается в верхней части шва.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА НА СОСТАВ МЕТАЛЛА ШВА

С изменением режима сварки изменяются условия протекания реакций как на электроде, так и в ванне вследствие изменения размеров и частоты переноса капель, размеров ванны и температурной обстановки в зоне плавления и др.

Так, с увеличением длины (напряжения) дуги увеличивается время взаимодействия и полнота протекания реакций на стадии капли. Соответственно этому увеличиваются потери легирующих элементов,

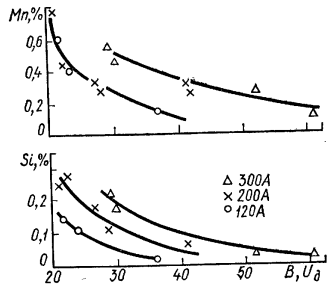


Рис. 8. Зависимость состава наплавленного металла от длины (напряжения) дуги $U_д$ и силы тока I при окислительных условиях сварки (сварка электродами УОНИ-13/55)

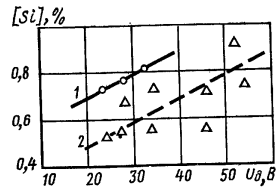


Рис. 9. Зависимость содержания кремния в наплавленном металле от напряжения (длины) дуги $U_д$ и силы тока I при кремневосстановительном процессе: $1 - I$ = 120 А; $2 - I$ = 230 А

а их содержание в наплавленном металле уменьшается в случае протекания окислительных реакций при сварке электродами УОНИ-13/55 (рис. 8). Наоборот, при восстановительных реакциях (сварка электродами с высокосиликатным покрытием, содержащим активный восстановитель — алюминий) удлинение дуги приводит к увеличению количества восстановленного элемента и его содержания в шве (рис. 9). Увеличение силы тока действует в противоположном направлении, уменьшая время взаимодействия на стадии капли.

Такая же картина наблюдается при сварке под флюсом. Наряду с изменением размера капель и времени взаимодействия в этом случае проявляется также зависимость от режима (относительной массы флюса). Полнота протекания реакций восстановления кремния и марганца при сварке под флюсом увеличивается

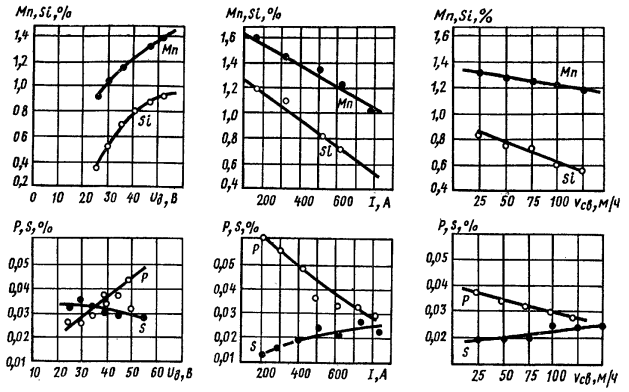


Рис. 10. Зависимость содержания Mn и Si в наплавленном металле при сварке под флюсом ФЦ-6 проволокой Св-10НМ от параметров режима (при изменении одного параметра остальные сохранялись постоянными) $I = 550$ А; $U_д = 38 \div 40$ В; $v_{св} = 25$ м/ч

с увеличением длины дуги и уменьшается с увеличением силы тока и скорости сварки (рис. 10). Удлинение дуги выше некоторого предела может также вызвать ухудшение защиты, о чем можно судить, например, по увеличению содержания в наплавленном металле азота, как это показано на примере сварки в углекислом газе проволокой, содержащей 0,16% C; 0,99% Mn и 0,95% Si (табл. 8).

8. Переход легирующих элементов и содержание газов в металле в зависимости от длины (напряжения) дуги

Напряжение дуги, В	Коэффициент перехода по элементам			Содержание газов в наплавленном металле	
	C	Mn	Si	O, %	N, см³/100 г
30	0,69	0,75	0,68	0,0190	10,2
35	0,62	0,62	0,66	0,0345	22,5
40	0,62	0,41	0,41	0,0475	26,0
45	0,50	0,36	0,35	0,0505	45,5

При более детальном анализе влияния режима сварки на состав наплавленного металла необходимо учитывать влияние режима на все величины, входящие в расчетные уравнения.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕТАЛЛА С ГАЗАМИ ПРИ СВАРКЕ

Расплавленный металл, взаимодействуя с окружающей атмосферой, поглощает кислород, азот, водород, что существенно сказывается на свойствах металла шва.

Растворение газов в жидком металле. Растворение двухатомного газа в металле описывается уравнением

$$\frac{1}{2}\,\Gamma_{2\,(газ)} \rightleftarrows [\Gamma]_{(раствор)}.$$

Константа равновесия этой реакции

$$K_г = \frac{a_г}{p_г^{1/2}} = \frac{f_г\,[\%\Gamma]}{p_г^{1/2}},$$

откуда следует известное правило квадратного корня (закон Сивертса)

$$[\%\Gamma] = \frac{K_г}{f_г}\,p_г^{1/2}, \qquad (25)$$

где $a_г$ и $f_г$ — активность и коэффициент активности газа, зависящие от состава расплава [1].

Растворимость газов в чистом железе при $f_г = 1$ и $p_{г_2} = 1$ кгс/см² характеризуется величиной $[\%\ \Gamma] = K_г$. При 1600° С

	$K_г$, %/ат$^{1/2}$
Азот	0,044
Водород	0,00245

Растворимость при $p_{г_2} = 1$ может быть пересчитана на любое другое парциальное давление $p_{г_2}$ газа по выражению (25).

При расчетном давлении кислорода $p_{O_2} = 0{,}8 \cdot 10^{-8}$ ат наблюдается образование жидких окислов. Поэтому рассматривают взаимодействие железа не с газообразным кислородом, а с окислом железа (FeO). Выражение (25) при этом примет вид

$$[\%O] = \frac{K_O}{\gamma_O}\,a_{FeO}. \qquad (26)$$

Если коэффициент активности γ_O кислорода в металле и активность FeO в шлаке равны единице, то $[\%\ O] = K_O$. При 1600° С $K_O = 0{,}23\%$. Равновесие металл—газ зависит от температуры. Эта зависимость выражается обычно эмпирическими уравнениями вида

$$\lg K_г = \frac{A}{T} + B,$$

где A и B постоянные, определяемые из опыта.

Для чистого железа при $p_{г_2} = 1$ и $a_{FeO} = 1$

$$\lg K_N = \lg [\%N] = -\frac{1050}{T} - 0{,}815;$$

$$\lg K_H = \lg [\%H] = -\frac{1720}{T} - 2{,}252;$$

$$\lg K_O = \lg [\%O] = -\frac{6320}{T} + 2{,}734.$$

При температурах, приближающихся к точке кипения металла, нужно учитывать противодавление паров металла, вызывающее снижение реальной растворимости газа.

Механизм поглощения двухатомного газа включает следующие основные стадии: диффузию газа к поверхности металла через пограничный слой, адсорбцию молекул газа на поверхности металла, разрыв связей между атомами под действием поверхностных сил и переход ими границы газ — металл и диффузию газа в металлической фазе. Кинетику адсорбции газа можно описать уравнениями вида (2), т. е. уравнениями первого порядка.

Особенности взаимодействия металл — газ при дуговой сварке. Приведенные выше численные значения растворимости газов в железе относятся к бездуговому (индукционному) нагреву. В дуге, где температура газа достигает 5000—15 000 К, газ находится в диссоциированном на атомы и частично ионизированном состоянии. Так, водород почти полностью диссоциирован на атомы уже при 5000 К, а азот — при 10 000 К. Условия равновесия в этом случае будут иными, и следует ожидать больших значений константы равновесия K и растворимости газа.

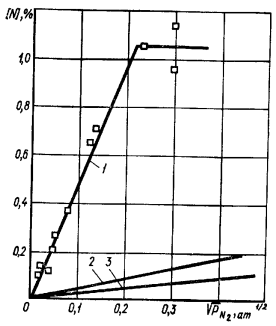


Рис. 11. Зависимость содержания азота в стали Х25Н16Г7АР при дуговом (*1*) и индукционном нагреве (*2, 3*) от парциального давления азота в аргоно-азотной смеси. Температура нагрева 1500° С (*2*) и 2200° С (*3*)

Надо учитывать, однако, что у поверхности расплава температура газа значительно снижается, приближаясь к температуре поверхности металла, и в пограничном слое должны идти обратные процессы деионизации газа и образования молекул из атомов. Пока неясно, сколь далеко они успевают пройти, что затрудняет количественные оценки, но во всяком случае очевидно, что в условиях дуговой сварки с металлом взаимодействуют активированные частицы, будь то атомы или же вновь образовавшиеся из них молекулы, обладающие избыточной энергией за счет не успевшей релаксировать энергии молизации. Активация газовых частиц в дуге увеличивает растворимость газа, как это можно видеть на примере абсорбции азота железом (рис. 11).

Горизонтальный участок на кривой дугового нагрева объясняют пузырьковым кипением ванны, пересыщенной азотом. Увеличение потока азота в ванну, вызванное увеличением его парциального давления в газовой фазе, приводит к соответствующему увеличению азотного кипения, в результате чего устанавливается стационарное состояние и содержание азота в ванне стабилизируется.

Поглощение газа при сварке плавящимся электродом происходит как на торце электрода, так и в ванне. Количество поглощенного газа определяется кинетикой процессов абсорбции и десорбции.

Условия абсорбции газа различны на разных участках поверхности ванны. Наиболее интенсивно газ поглощается в области, расположенной непосредственно под дугой, в то время как на периферии ванны возможна даже десорбция газа. Поэтому скорость поглощения и конечное содержание газа в металле зависят от размеров ванны и распределения теплового и газового потоков на ее поверхности.

Источники газов в зоне сварки. Азот попадает в зону сварки главным образом из воздуха. Источниками кислорода и водорода являются воздух, сварочные материалы (электродные покрытия, флюсы, защитные газы и т. п.), а также окислы, адсорбированная влага и другие загрязнения на поверхности основного и присадочного металла. Наконец, кислород, водород и азот могут содержаться в избыточном (сверхравновесном) количестве в переплавляемом металле.

Несмотря на различные способы изоляции расплавленного металла от воздуха (электродные покрытия, флюсы, защитные газы и т. п.), исключить полностью его попадание в зону сварки практически невозможно. Даже при сварке в вакууме с разрежением 10^{-4} мм рт. ст. парциальное давление в камере установки остаточного кислорода и азота составит соответственно $0{,}28 \cdot 10^{-7}$ и $1{,}32 \cdot 10^{-7}$ кгс/см².

Сопоставление этих данных с равновесным давлением кислорода, например, в системе

$$2\,Ti_{ж} + O_2 \rightleftarrows 2\,TiO_{ж},$$

равным $1{,}49 \cdot 10^{-17}$ кгс/см² при 2000 К (т. е. вблизи точки плавления), показывает, что атмосфера в камере по отношению к титану является окислительной.

При сварке в инертных газах со струйной защитой возможен подсос воздуха вследствие турбулентности газового потока. Только при сварке в камере с инертной атмосферой при условии хорошей предварительной откачки и продувки ее инертным газом можно говорить об отсутствии воздуха в зоне сварки. Но при этом нужно считаться с наличием примесей в инертном газе. Так, в аргоне согласно ГОСТ 10157—73 может содержаться максимально:

кислорода	$\leqslant$ 0,0001 об. %
азота	$\leqslant$ 0,008 об. %
водяных паров	$\leqslant$ 0,01 г/м³ при нормальных условиях (20° С, 760 мм рт. ст.)

Поэтому при сварке химически активных металлов рекомендуется дополнительная очистка аргона перед подачей его в камеру или горелку. Взаимодействие металла с кислородом воздуха возможно даже через слой шлака. Наиболее заметно это взаимодействие проявляется при электрошлаковой сварке, когда шлаковая ванна длительное время контактирует с воздухом. На границе расплавленный шлак—воздух низшие окислы шлака обогащаются кислородом, который по схеме реактивной диффузии переносится через шлак к металлу.

Удобным показателем степени защиты зоны сварки от воздуха может служить содержание в наплавленном металле азота (если, конечно, его нет в расплавляемом металле или в защитном газе). При сварке покрытыми электродами и порошковой проволокой нарушение защиты и соответствующее ему увеличение в шве азота особенно заметно проявляется при удлинении дуги.

	N, %
Основной металл и проволока (низкоуглеродистая сталь)	0,002—0,003
Сварка голой проволокой без защиты	0,1—0,2
Сварка рутиловыми электродами ЦМ-9	0,035
Сварка фтористокальциевыми электродами (УОНИ-13/55) диаметром, мм:	
5	0,024
2,5	0,062
Сварка порошковой проволокой ЭПС-15/2:	
короткая дуга ($U_д = 23 \div 26$ В)	0,004—0,010
длинная дуга ($U_д = 32$ В)	0,038

Воздух в зависимости от его влажности может служить также источником водорода. Именно влага воздуха является причиной так называемой сезонной пористости, когда содержание водорода в швах повышается во влажные периоды года (при прочих неизменных условиях). Влага содержится также в углекислом газе.

Углекислый газ является энергичным окислителем, взаимодействуя с металлом по реакции

$$m\,CO_2 + n\,Me \rightleftarrows m\,CO + Me_nO_m.$$

Кроме воздуха и защитных газов, источниками кислорода и водорода являются покрытия, флюсы и шихта порошковой проволоки, которые почти всегда содержат в своем составе различные окислы, карбонаты и другие соединения, способные передавать кислород металлу, а также гигроскопическую и связанную влагу, входящую в структуру минералов в виде молекул в кристаллогидратах или в воде гидроксильной группы ОН в гидроокисях. Если гигроскопическую и кристаллизационную воду можно сравнительно легко удалить и соответственно понизить содержание влаги в покрытии и водорода в металле шва путем нагрева электрода перед сваркой до относительно невысокой температуры, то для удаления воды из гидроокисей, содержащихся, например, в низкокремнистых флюсах типа 48-ОФ-6, требуется прокалка флюса при температуре 800° С и выше.

Важным источником выделения газов являются поверхностные загрязнения. Это прежде всего поверхностные окислы, которые, растворяясь в металле при его расплавлении и взаимодействуя с ним, способствуют насыщению ванны кислородом. Поверхностные окислы могут быть также поставщиками водорода. Примером является ржавчина, представляющая собой гидрат окиси железа, разлагающийся при нагреве с выделением паров воды. Значительное количество влаги содержит окисная пленка на алюминиевых и магниевых сплавах. Влага, абсорбированная окисной пленкой, удерживается на поверхности при нагреве до высокой температуры, вследствие чего абсорбция водорода металлом оказывается возможной за счет прямого взаимодействия расплава с влагой, попадающей в ванну вместе с частицами окисной пленки. Кроме окисной пленки и адсорбированной влаги на поверхности металла имеются жировые и пылевые загрязнения, включающие органические и сажистые вещества. Термическое разложение органических веществ приводит к образованию водородсодержащих газов, а сажистые вещества могут явиться источником CO.

Наконец, металл основной и присадочный может быть загрязнен газами, которые при его расплавлении могут переходить в металл шва или выделяться в виде газовых пузырьков, являясь причиной пористости.

Взаимодействие с кислородом. При контакте расплавленного металла с кислородом газовой или шлаковой фазы происходит растворение кислорода в металле, а при достижении концентрации насыщения — образование отдельной окисной фазы.

Одновременно идет окисление примесей и легирующих элементов, содержащихся в металле. В первую очередь окисляются элементы, обладающие большим сродством к кислороду. Судить о сродстве к кислороду можно по величине стандартного изменения свободной энергии ΔG^0 образования окисла или по упругости его диссоциации p_{O_2}. При взаимодействии чистого вещества с кислородом

$$Me + O_2 = MeO_2;$$

$$K = \frac{1}{p_{O_2}};$$

$$\Delta G^0 = -RT \ln K = RT \ln p_{O_2},$$

т. е. упругость диссоциации зависит только от температуры, как константа равновесия.

Однако при взаимодействии с кислородом этого же вещества, находящегося в растворе

$$[Me]_{раств} + O_2 = [MeO_2]_{раств},$$

необходимо учитывать активность веществ

$$K = \frac{a_{MeO_2}}{a_{Me} p_{O_2}};$$

$$p_{O_2} = \frac{1}{K} \frac{a_{MeO_2}}{a_{Me}},$$

т. е. в этом случае упругость диссоциации будет зависеть не только от температуры, но и от концентрации растворенных веществ, так как активности изменяются с концентрацией.

Если парциальное давление кислорода pO_2 в атмосфере над расплавом больше давления (упругости) диссоциации окисла данного элемента P_{O_2}, то атмосфера будет по отношению к нему окислительной (будет происходить образование окисла), и наоборот, если $p_{O_2} < P_{O_2}$, то атмосфера будет иметь восстановительный характер. Продукты окисления удаляются в шлак, но могут частично застревать в металле при его затвердевании. При охлаждении металла и особенно при его кристаллизации возможны вторичные реакции образования окислов вследствие изменения условий равновесия (понижения растворимости кислорода). Такие окислы большей частью остаются в металле в виде неметаллических включений или газовых пузырей (результат реакции [C] + [O] = CO).

Взаимодействие с азотом. Азот растворяется в большинстве конструкционных металлов и сплавов и со многими элементами образует нитриды. Наличие нитридообразующих элементов в расплаве, увеличивая силы связи металла с азотом, увеличивает его растворимость, уменьшая тем самым степень возможного пересыщения расплава и опасность азотного кипения и образования пор. Концентрация азота в металле шва зависит от степени изоляции металла от воздуха (или в более общем виде от парциального давления азота в атмосфере) и от условий сварки, определяющих кинетику протекания реакции. Значительное влияние оказывает скорость сварки, как это показано на рис. 12, на котором представлены результаты опыта по сварке стали 12Х18Н10Т вольфрамовым электродом в смеси аргон—азот. Значительное снижение содержания азота в переплавленном металле с увеличением скорости сварки объясняется главным образом уменьшением при этом времени взаимодействия.

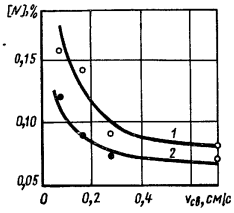


Рис. 12. Влияние скорости сварки на поглощение азота (сварка стали 12Х18Н10Т):
1) $p_{N_2} = 0{,}05$ кгс/см²; *2)* $p_{N_2} = 0{,}02$ кгс/см²

Опыты показывают, что абсорбция азота заметно возрастает при наличии в атмосфере кислорода, что объясняют образованием в дуге непрочных окислов азота.

Взаимодействие с водородом. Абсорбция расплавленным металлом из газовой фазы водорода, так же как и азота, описывается уравнением реакции (25).

Опыты Дж. Салтера, который измерял содержание водорода в металле слитков, получавшихся при расплавлении образцов металла в медной изложнице вольфрамовым электродом в аргоно-водородной атмосфере, показали, что абсорбция водорода при дуговом нагреве превышает его стандартную растворимость. При сварке в аргоне при парциальном давлении водорода 0,2 кгс/см² содержание водорода в шве было равным 18,0 см³/100 г. Полагая, что справедливо правило Сивертса, применяя выражение (25) и принимая $f_H = 1$, получим $K_H = 41{,}0$ см³/100 г. Стандартная же растворимость водорода в железе по известной формуле М. М. Карнаухова и А. Н. Морозова

$$\lg K_H = -\frac{1745}{T} - 1{,}72$$

при 2000 К составит 28,8 см³/100 г.

Водород поглощается металлом, а при контакте последнего с водяным паром — по уравнению реакции

$$m H_2O + n Me \rightarrow Me_nO_m + m H_2.$$

Поэтому при наличии влаги в сварочных материалах велика опасность насыщения металла водородом (рис. 13). Растворяясь в процессе сварки, водород благодаря большой его подвижности (например, коэффициент диффузии водорода в железе при 1100 °С равен $1{,}9 \cdot 10^{-4}$, а азота в тех же условиях всего $3{,}8 \cdot 10^{-7}$ см²/с) способен частично уходить из затвердевшего металла шва в атмосферу и в свариваемый металл. Поэтому, определяя общее количество водорода, поглощенного при сварке, подразделяют его на диффузионно-подвижный и остаточный. Первый находят, помещая образец немедленно после сварки в эвдиометр, заполненный ртутью или другой жидкостью, не растворяющей водород, и судят о количестве водорода по вытеснению им жидкости из мерной трубки. Скорость выделения газа постепенно затухает и практически прекращается через некоторое время, после чего в образце определяют остаточный водород методом вакуумного нагрева или вакуумного плавления.

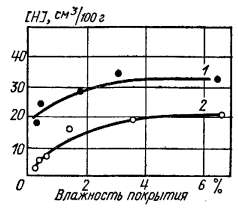


Рис. 13. Влияние влажности покрытия рутилового *1* и фтористокальциевого *2* на содержание водорода в наплавленном металле

Соотношение между количествами диффузионно-подвижного и остаточного водорода зависит от состава металла, применяемых сварочных материалов и условий сварки и может изменяться в широких пределах [3]. Поэтому оценка условий взаимодействия водорода с металлом только по количеству диффузионно-подвижного водорода явно недостаточна. К сожалению, это далеко не всегда принимают во внимание.

Влияние газов на свойства металла шва. Поглощение кислорода металлом ухудшает его механические свойства. Так, увеличение кислорода в низкоуглеродистой стали с 0,01—0,02% до 0,1% приводит к снижению относительного удлинения более чем на 30% и ударной вязкости более чем на 40%. Несколько снижается и временное сопротивление (рис. 14, *а*). Азот в этой стали также сильно снижает относительное удлинение, но повышает прочностные характеристики металла (рис. 14, *б*). Поэтому при сварке низкоуглеродистой стали на воздухе без защиты совместное действие кислорода и азота вызывает резкое охрупчивание металла, но мало сказывается на его временном сопротивлении (табл. 9). Особенно нежелательным является взаимодействие с кислородом металлов, обладающих большим сродством к нему, и со сталью и сплавами, содержащими такие компоненты (хром, титан, ниобий, ванадий и др.), так как в этом случае интенсифицируются процессы окисления, уменьшается содержание важных легирующих элементов, образуются неметаллические включения.

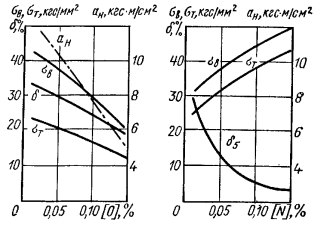


Рис. 14. Влияние кислорода и азота на свойства железа (низкоуглеродистой стали)

Влияние кислорода и азота на механические свойства титана показано на рис. 15. Содержание азота является одной из причин образования пор в металле шва. При сварке покрытыми электродами или в защитных газах такие поры нередко образуются в результате нарушения защиты металла от воздуха, например при зажигании дуги (так называемые стартовые поры) или при случайном удлинении. Предупреждение их представляет значительные трудности.

9. Влияние содержания газов в металле шва на его свойства

Металл	O, %	N, %	$\sigma_в$, кгс/мм²	δ, %	$a_н$, кгс·м/см²
Основной и присадочный (кипящая низкоуглеродистая сталь)	До 0,02	0,04—0,08	40	25—30	12
Шва при сварке:					
на воздухе без защиты проволокой Св-08А . .	0,1—0,3	0,1—0,2	35—40	5—10	0,5—1
электродом УОНИ-13/45*¹	0,01	0,05	45	25	20
в углекислом газе*² . . .	0,02—0,03	0,01—0,02	50—55	20—30	8—10

*¹ Присадки Mn и Si в покрытие.
*² Проволока Св-10ГС.

В стали ряда марок азот используется как легирующий элемент, упрочняющий металл. При сварке таких сталей необходимо избегать снижения содержания азота в металле шва, что может быть достигнуто, например, за счет сварки в аргоне с примесью небольшого количества азота.

Водород, как и азот, вызывает образование пор и является причиной так называемых сварочных флокенов — небольших трещинок волосных размеров, обнаруживаемых в виде светлых пятен в изломах металла при повышенном содержании в нем водорода. Удаление из металла диффузионно подвижного водорода при длительной выдержке может предотвратить образование флокенов.

При сварке легированной стали водород является причиной образования холодных трещин. При сварке

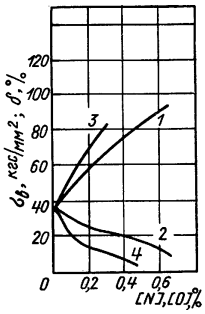


Рис. 15. Влияние кислорода (*1, 2*) и азота (*3,4*) на предел прочности (*1,3*) и относительное удлинение (*2,4*) титана

титана увеличение содержания водорода приводит к значительному снижению ударной вязкости и повышает склонность к хрупкому разрушению.

H, %	$a_н$, кгс·м/см²
0,002	>15
0,01 — 0,02	8 — 4

ВЫДЕЛЕНИЕ ГАЗОВ ИЗ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ И ОБРАЗОВАНИЕ ПОР

С понижением температуры расплава и особенно при его кристаллизации уменьшается растворимость газов в металле (как это в качестве примера показано для азота и водорода в железе на рис. 16) и возникает пересыщение металла газом. Пересыщение может также носить местный характер, являясь результатом неравномерного распределения газа, случайных флуктуаций или протекания реакций с выделением газообразных продуктов. Если степень пересыщения достаточно велика, чтобы преодолеть силы, препятствующие возникновению и развитию газовых зародышей, в металле появляются газовые пузыри, и если они не успевают удалиться до его затвердевания, то в шве образуется пористость.

Таким образом, меры предупреждения пористости в металле шва можно разбить на две группы: меры, способствующие уменьшению степени пересыщения металла газом или подавлению реакций, идущих с газовыделением, и меры, способствующие наиболее полному удалению газовых пузырей из сварочной ванны или подавлению их образования.

Чтобы уменьшить пересыщение металла газом, следует стремиться понизить концентрацию газа в зоне сварки, лучше всего устранив возможные источники поступления газа; уменьшить абсорбцию газа металлом путем уменьшения скорости или времени взаимодействия за счет соответствующего регулирования технологических параметров (силы тока, скорости сварки и т. п.); повысить стандартную растворимость газа, легируя металл соответствующими элементами, что, уменьшая разность между равновесной концентрацией и концентрацией пересыщения, должно понизить вероятность выделения газа из расплава (пузырькового кипения). В зависимости от газа, вызывающего пористость, и условий сварки эти задачи могут быть решены различным образом.

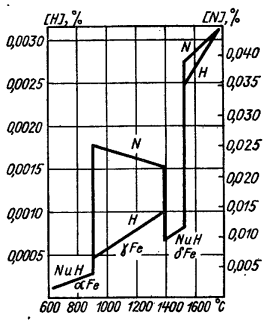


Рис. 16. Растворимость газов в железе при давлении 1 кгс/см²

Исследования показали, что образование пор вызывают азот, водород и отчасти CO, образующиеся в результате реакции окисления углерода C + O = CO. При сварке углеродистой стали основная роль принадлежит водороду; при сварке аустенитной стали и сплавов, в которых растворяется значительно больше водорода, на первый план выступает роль азота. Мнение о том, что при удлинении дуги и других нарушениях защиты появление пористости связано с окислением металла и образованием CO, не подтверждается опытом [1,3].

Чтобы понизить содержание азота, практически единственным источником которого является воздух (за исключением сварки азотосодержащих стали и сплавов), необходимо обеспечить максимально возможную защиту металла от воздуха. Другой путь — легирование ванны нитридообразующими элементами — титаном, хромом и др.

Исключение из зоны сварки водорода реализуется труднее, поскольку он обычно содержится в сварочных материалах. Средствами снижения концентрации водорода служат применение сварочных материалов с минимально возможной концентрацией водорода (водородсодержащих веществ); прокалка или просушка перед сваркой электродов флюсов (эффективность этого способа иллюстрируется рис. 13); тщательная очистка поверхности свариваемого и присадочного металла от окислов, адсорбированной влаги, органических загрязнений и т. п.; введение в покрытия и флюсы фтористых соединений, например фтористого кальция (плавикового шпата), способных переводить водород в нерастворимые в металле соединения с фтором.

Существуют и другие металлургические пути борьбы с водородной пористостью. Например, введение в зону сварки окислителей, с тем чтобы согласно реакции $H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O$ уменьшить парциальное давление водорода и тем самым абсорбцию водорода металлом.

Специфический характер носит образование пористости при сварке химически активных металлов — алюминия, титана и их сплавов и др., где роль поверхностных загрязнений особенно велика.

Известно, что поры образуются при сварке этих металлов встык, однако отсутствуют при проплавлении целого куска того же металла. Отсюда следует, что поры вызываются загрязнениями, расположенными на торцах стыкуемых листов, а не на их поверхности. Механизм этого явления можно представить в следующем виде.

При нагреве свариваемых кромок в процессе сварки по мере повышения температуры в местах скопления загрязнений начинаются термическое разложение органических веществ, испарение адсорбированной влаги и другие процессы, приводящие к газообразованию. Газы легко удаляются с наружных поверхностей, но могут задерживаться между кромками, особенно если зазор между ними мал, что обычно имеет место вследствие термического сжатия соединяемых деталей.

При плотно сжатых кромках (при отсутствии свободного выхода газа) в естественных неровностях их поверхностей появляются микрообъемы, заполненные газом, который находится под давлением. С повышением температуры возрастает давление газа, вызывая локальную деформацию нагретого и потому достаточно пластичного металла и образование между кромками сферических газовых пузырей. Все это происходит на участках впереди источника теплоты (дуги), где температура хотя и достаточно высока, чтобы вызвать газообразование, но еще не достигла точки плавления металла. Но по мере продвижения ванны

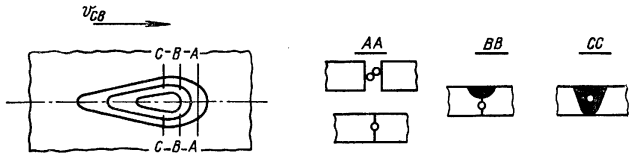


Рис. 17. Схема образования пор при сварке встык алюминиевых сплавов

эти газовые зародыши могут захватываться расплавленным металлом, развиваться и всплывать или оставаться в металле шва в виде газовых пор (рис. 17). При отсутствии загрязнений или адсорбированной влаги на кромках поры, естественно, не образуются.

Роль зазора между кромками иллюстрируется опытом по сварке встык образцов из сплава АМГ с жестко заданным зазором различной величины и с искусственно нанесенными на кромки загрязнениями. При отсутствии зазора наблюдалась значительная пористость в металле шва и в зоне несплавления (при сварке с неполным проплавлением). В случае небольшого зазора (менее 0,1 мм) были зафиксированы поры в металле шва (не успевшие всплыть газовые пузырьки). Если зазор превышал 0,1 мм, поры, как правило, отсутствовали.

Далеко не всегда удается устранить источники попадания газов в зону сварки или снизить их содержание в атмосфере дуги до безопасного уровня. В таком случае возникает задача управления кинетикой реакций так, чтобы в возможно большей степени уменьшить абсорбцию газов расплавом. Очевидно, содержание газа будет тем меньше, чем меньше скорость реакции и время взаимодействия.

Из уравнения (21) следует, что поглощение газа будет тем меньше, чем больше скорость плавления металла и чем меньше поверхность ванны F или произведение $\beta\rho F$ в целом (см. рис. 6). Решающим фактором, влияющим на эти параметры, является скорость сварки.

Другая группа способов предупреждения пористости основывается на управлении процессом роста газовых пузырьков или их удаления (всплывания) из ванны.

Развитию газовых зародышей препятствует внешнее давление (давление атмосферы и столба жидкости) плюс поверхностное (капиллярное) давление:

$$p = \rho_{ж} h + p_{атм} + \frac{2\sigma}{r},$$

где $\rho_{ж}$ — плотность расплава; h — глубина расположения зародыша над уровнем расплава; σ — поверхностное натяжение; r — радиус зародыша.

Поэтому, повышая внешнее давление при сварке в камере с инертной атмосферой, можно подавить развитие газовых пузырьков в расплаве и таким образом уменьшить или даже полностью устранить пористость в металле шва. Наряду с возникновением и ростом газовых пузырьков в расплаве идет их удаление (всплывание) из ванны. Степень пористости определяется в конечном счете разностью скоростей этих процессов. К сожалению, процесс удаления газовых (и неметаллических) включений почти не исследован. Попытки применить уравнение Стокса нельзя признать оправданными, так как это уравнение, описывающее всплывание сферических частиц под действием архимедовой силы (разности плотностей), не учитывает неизотермических условий в ванне, конвективных потоков в ней, отклонение формы пузырьков от сферической формы и их рост во время всплывания в результате диффузии растворенных газов.

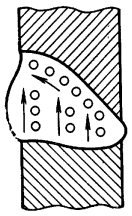


Рис. 18. Схема всплывания газовых пузырьков при горизонтальной сварке

Практически регулирование процесса удаления газовых пузырьков возможно следующими способами.

1. Интенсификацией процесса газовыделения. Чем интенсивнее происходит выделение газа, тем большее его количество успевает удалиться из металла до затвердевания последнего, если, конечно, интенсивность уменьшается со временем и газовыделение прекращается до начала затвердевания металла. На этом, например, основано введение в покрытие рутиловых электродов минералов, содержащих кристаллизационную воду (слюда, тальк и т. п.), с тем, чтобы повысить абсорбцию водорода и усилить его выделение в высокотемпературной зоне сварочной ванны вдали от фронта кристаллизации, где удаление газовых пузырьков затруднено [3].

2. Увеличением времени существования металла в ванне за счет увеличения размеров (длины) ванны и замедления скорости сварки.

3. Уменьшением внешних препятствий для удаления пузырьков (твердых поверхностей на пути их всплывания). Схематически это показано на рис. 18. Увеличение угла скоса верхней кромки при сварке сплава АМг6 привело к уменьшению пористости за счет более свободного удаления газовых пузырьков:

Θ°	0	15	30	45
Объем пор, см³/100 г	0,72	0,43	0,31	0,16

Из сказанного видно, что влияние параметров режима на образование пористости в металле шва может проявляться по-разному в зависимости от условий поглощения и выделения газов и удаления газовых пузырьков.

Поэтому нельзя дать однозначных общих рекомендаций по выбору режима сварки.

Так, например, с увеличением скорости сварки уменьшается поверхность ванны (поверхность контакта металл—газ) и время взаимодействия. В результате затрудняется как абсорбция газа из атмосферы, так и всплывание (удаление) образовавшихся газовых пузырьков.

Если источником газа является атмосфера, то, очевидно, уменьшение абсорбции газа с увеличением скорости сварки будет способствовать уменьшению пористости. Однако если газовыделение вызывается поверхностными загрязнениями на свариваемых кромках, то решающее значение получают условия удаления газовых пузырьков из ванны и в этом случае увеличение скорости сварки будет, наоборот, способствовать увеличению пористости.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕТАЛЛА СО ШЛАКОМ

При расплавлении сварочного флюса, электродного покрытия, сердечника порошковой проволоки образуется шлак. Основное назначение сварочного шлака — изоляция расплавленного металла от воздуха. Однако флюсы, покрытия и т. п. выполняют и другие не менее важные функции — стабилизируют дугу, способствуют формированию шва, осуществляют металлургическую обработку расплавленного металла — его раскисление и легирование. Кроме того, шлаки часто содержат окислы и другие компоненты, способные взаимодействовать с металлом. Поэтому понимание металлургических реакций, протекающих между металлом и шлаком, имеет большое значение для правильной организации сварочного процесса.

Окислительное действие компонентов сварочных материалов. Сварочные материалы (флюсы, покрытия и т. п.) содержат по ряду причин окислы, карбонаты и другие компоненты, способные окислять металл.

10. Потери легирующих элементов

Материал	Потери (1 — η), %			
	C	Mn	Si	Cr
Гематит	79	95	90	95
Мрамор	67	83	98	79
Кварцевый песок	81	82	25	55
Рутил	—	78	58	20
Плавиковый шпат	32	61	11	11

Окислительное действие некоторых наиболее часто встречающихся компонентов сварочных материалов характеризуется данными табл. 10, в которой приведены потери (1 — η) углерода, марганца, кремния и хрома из проволоки Св-18ХГСА (0,21% C; 1,08% Mn; 1,0% Si; 1,05% Cr) при сварке электродами с покрытиями, составленными из одного компонента и с силикатом натрия в качестве связующего; относительная масса покрытия $k_{п} = 0{,}3$.

Опыт иллюстрирует сильное окислительное действие окислов железа (гематита), различное поведение марганца и кремния, особенно наглядно проявляющееся при изменении относительной массы покрытия $k_{п}$ (рис. 19). Заметные потери марганца при нейтральном покрытии из плавикового шпата по всей вероятности объясняются наличием повышенного количества силиката натрия (вводимого во избежание растрескивания покрытия при сушке). Увеличение потерь (уменьшение коэффициента перехода η) с увеличением относительной массы шлака χ, косвенно характеризуемой относительной массой покрытий $k_{п}$, объясняется рядом причин.

Во-первых, от χ зависят равновесные концентрации реагентов. Роль этого фактора покажем на примере реакции окисления — восстановления марганца. Распределение марганца между шлаком и металлом

$$L_{Mn} = \frac{(\%MnO)}{[\%Mn]} = K'_{Mn}\,(\%FeO)\,\frac{\gamma_{FeO}}{\gamma_{MnO}}.$$

Примем, что в шлаке содержится 10% FeO и 15,5% MnO, а исходные содержания марганца в металле $c'_0 = 1{,}6\%$ и в шлаке $c''_0 = 0{,}775 \cdot 15{,}5 = 12\%$. Отнесем равновесие к температуре, равной 1950 К ($K'_{Mn} = 1{,}8$). Тогда $L_{Mn} = 1{,}8 \cdot 10 \cdot 6{,}15 \approx 110$, а равновесное содержание марганца согласно уравнению (1) в зависимости от χ или $k_{п}$ (понимая под $k_{п}$ относительную массу расплавленного шлака), будет

$K_{п}(\chi)$	0,5	0,1	0,2	0,5	1,0
$[\%\,Mn]_{р}$	0,34	0,23	0,15	0,135	0,12

Уменьшение равновесной концентрации с ростом $k_п$, увеличивая разность $c - c_р$, должно привести к увеличению скорости реакции согласно уравнению (2) и соответственно к увеличению потерь марганца.

Во-вторых, с возрастанием $k_п$ увеличивается поверхность контакта металл—шлак как на стадии электрода (за счет удлинения втулки из нерасплавившегося

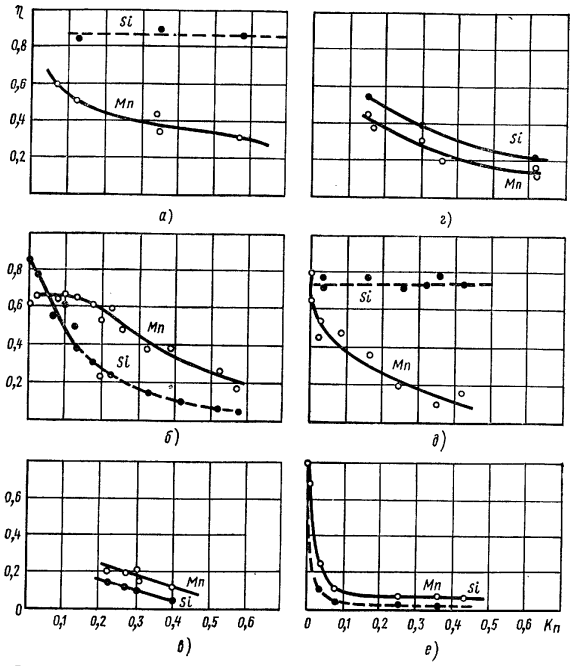


Рис. 19. Зависимость коэффициентов перехода η марганца и кремния от относительной массы покрытия:

а — плавиковый шпат; *б* — 20% плавикового шпата и 80% мрамора; *в* — мрамор; *г* — рутил; *д* — кварцевый песок; *е* — гематит

покрытия), так отчасти и в ванне (за счет удлинения дуги, увеличения ее мощности и размеров ванны).

В-третьих, с увеличением $k_п$ уменьшается степень изменения состава шлака в процессе сварки вследствие перехода в него окислов, образующихся при сварке.

В случае сильно окисленного шлака с увеличением $k_п$ увеличивается его окислительная способность (больше содержится Fe_2O_3) (табл. 11).

Большое значение имеет также смачивание шлаком расплавленного металла. Однако этот вопрос изучен весьма мало.

Окисление примесей металла сопровождается увеличением содержания кислорода, как это показано в качестве примера на рис. 20.

Большое практическое значение имеет система мрамор — плавиковый шпат ($CaCO_3$—CaF_2), широко применяемая в сварочных материалах (электродных покрытиях, керамических флюсах и т. п.). Окисление металла мрамором зависит от количества CO_2, образующейся при диссоциации мрамора, условий контакта CO_2 с расплавленным металлом и химических свойств шлака.

11. Влияние относительной массы шлака на его состав

Компоненты шлака	Исходный состав шлака, %	Состав шлака (в %) при $k_п$		
		0,035	0,08	0,25
Fe_2O_3	77,4	57,1	64,3	73,5
MnO	—	21,6	14,2	4,2

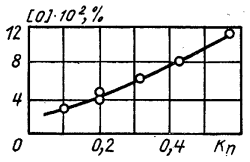


Рис. 20. Зависимость содержания кислорода от относительной массы покрытия. Покрытие из 20% плавикового шпата и 80% мрамора

С увеличением $CaCO_3$ увеличивается p_{CO_2} и основность шлака (CaO/SiO_2). По отношению к кремнию оба эти фактора действуют одинаково, способствуя окислению кремния (уменьшению коэффициента перехода η), а по отношению к марганцу — в противоположные стороны: рост p_{CO_2} увеличивает окисление, рост основности — уменьшает его, что приводит к образованию максимума на кривых для марганца (рис. 21). Окислительное действие компонентов покрытий и флюсов вызвало применение безокислительных покрытий, не содержащих окислов железа и карбонатов, и безкислородных флюсов на основе плавикового шпата. Эти материалы применяются

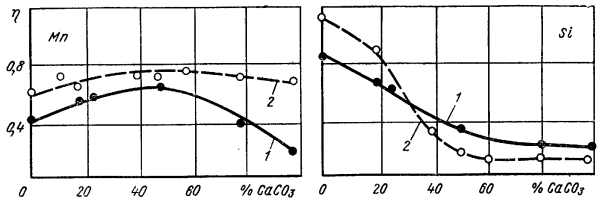


Рис. 21. Зависимость коэффициентов перехода марганца и кремния от содержания мрамора в бинарном покрытии мрамор—плавиковый шпат ($k_п = 0,3$). Стержень электродов из проволоки Св-18ГСА (*1*) и Св-12Х18Н10Т (*2*)

главным образом для сварки специальной стали и металлов, обладающих большим сродством к кислороду.

Влияние основности шлака. Рассмотрим подробнее вопрос о роли основности шлака (отношения CaO/SiO_2).

Переход марганца и кремния при постоянной концентрации окислителя (мрамора) в покрытии электродов но при изменяющейся основности, показан на рис. 22.

Для реакции

$$[Mn]+(FeO)\rightleftarrows(MnO)+[Fe]$$

$$K'_{Mn}=\frac{a_{MnO}a_{Fe}}{a_{FeO}a_{Mn}}.$$

При сравнительно небольшой концентрации марганца в железе $a_{Fe}=1$ и $a_{Mn}=[\%Mn]$. Тогда

$$K_{Mn}=\frac{a_{MnO}}{a_{FeO}[\%Mn]}=\frac{(\%MnO)\,\gamma_{MnO}}{[\%Mn]\,a_{FeO}}$$

и коэффициент распределения марганца между металлом и шлаком

$$L_{Mn}=\frac{(\%MnO)}{[\%Mn]}=K'_{Mn}\frac{a_{FeO}}{\gamma_{MnO}}.$$

Известно, что для кислых шлаков γ_{MnO} в несколько раз меньше, чем для основных.

Следовательно, при повышении основности шлака коэффициент распределения

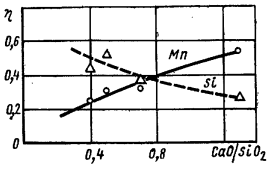


Рис. 22. Зависимость коэффициентов перехода марганца и кремния от основности шлака ($k_п = 0,4$)

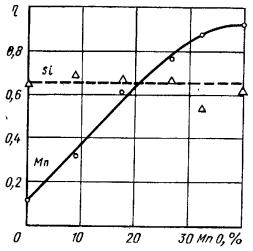


Рис. 23. Зависимость коэффициентов перехода марганца и кремния от содержания MnO в шлаке ($k_п = 0,42$, стержень — Св-18ХГСА)

L_{Mn} должен уменьшаться и содержание марганца в металле согласно выражению

$$[\%Mn]=\frac{(\%MnO)}{L_{Mn}} \qquad (27)$$

при постоянном содержании MnO в шлаке должно увеличиваться, что мы и видим на рис. 24. Из выражения (27) следует также, что при постоянной основности шлака (L_{Mn} = const) увеличение содержания MnO в шлаке должно привести к увеличению марганца в наплавленном металле (рис. 23).

Аналогично для реакции

$$[Si]+2(FeO)\rightleftarrows(SiO_2)+2[Fe]$$

получим

$$L_{Si}=K_{Si}\frac{a^2_{FeO}}{\gamma_{SiO_2}} \quad \text{и} \quad [\%Si]=\frac{(\%SiO_2)}{L_{Si}}.$$

Известно, что для бинарной системы $CaO—SiO_2$ коэффициент γ_{SiO_2} уменьшается с уменьшением (SiO_2). Таким образом, увеличение основности шлака (уменьшение в нем SiO_2) должно привести к увеличению L_{Si} и снижению содержания кремния в наплавленном металле, что мы и видим на рис. 24.

Проведенные рассуждения хотя и носят упрощенный характер, но позволяют наиболее наглядно пояснить влияние основности шлака на протекание реакций окисления шлаком кремния и марганца.

Реакция восстановления кремния и марганца из шлака. Из выражений реакций окисления кремния и марганца следует, что условием протекания этих реакций влево, т. е. в сторону восстановления марганца и кремния, является низкая активность FeO в шлаке. Если это условие выполняется, как, например, при сварке под флюсом или при наличии в зоне сварки энергичных раскислителей, возможно развитие марганце- и кремневосстановительного процессов. Равновесные концентрации марганца и кремния будут соответственно равны

$$[\%Mn]_p=\frac{1}{K'_{Mn}}\frac{a_{MnO}}{a_{FeO}};$$

$$[\%Si]_p=\frac{1}{K_{Si}}\frac{a_{SiO_2}}{a^2_{FeO}}.$$

Влияние содержания в шлаке FeO на степень восстановления кремния показано на рис. 24.

Аналогично действуют и другие окислители. Повышение окислительного потенциала покрытия или флюса является одним из путей подавления реакций восстановления кремния и марганца. Развитию реакций восстановления кремния и марганца при сварке способствует высокая температура в зоне сварки, так как эти реакции являются эндотермическими, т. е. идут с поглощением теплоты.

Классическим примером интенсивного протекания при сварке реакций восстановления кремния и марганца является сварка низкоуглеродистой стали под флюсами с высоким содержанием силикатов и окислов марганца. Повышенное содержание кремния и особенно марганца (за счет их восстановления из шлака) позволяет применять проволоку Св-08А вместо кремнемарганцовистой проволоки.

Неизотермические условия сварочного процесса приводят к тому, что в зоне понижающейся температуры (в хвостовой части ванны) реакции восстановления кремния и марганца меняют направление, в результате чего образуются окислы, удаление которых затруднено; это приводит к увеличению содержания кислорода в металле. Окисные включения, имеющие обычно весьма малые размеры, заметно ухудшают свойства металла шва, особенно его ударную вязкость при низких температурах, как это видно из табл. 12 на примере сварки стали 16ГНМА.

12. Ударная вязкость металла шва

Вид сварки	Содержание кислорода, %	Ударная вязкость (в кгс·м/см²) при температуре испытания, °С				
		+20	0	−20	−40	−80
Под флюсом ФЦ6	0,092	7,6	3,7	2,6	1,7	0,8
Электронно-лучевая	0,001	17,6	15,4	14,1	13,6	9,7

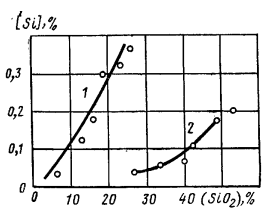


Рис. 24. Зависимость содержания кремния в наплавленном металле от содержания FeO в покрытии электрода:

1 — 11% FeO; *2* — 20% FeO

Восстановительные процессы особенно интенсивно протекают при наличии энергичных раскислителей — алюминия, титана и др. (рис. 25). Поэтому при сварке легированной стали рекомендуется применение низкокремнистых флюсов. Влияние содержания SiO_2 во флюсе на пластичность металла шва при сварке

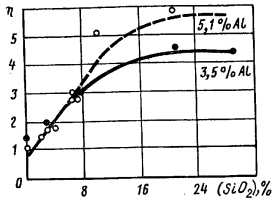


Рис. 25. Зависимость коэффициента перехода кремния от содержания SiO_2 во флюсе и алюминия в проволоке (при 17% Mn). Основа флюса: $CaO—Al_2O_3—CaF_2$

13. Шлаковые включения и пластичность металла шва

Состав, %					Шлаковые включения, %	Угол загиба, градусы
флюса		металла шва				
SiO_2	MnO	Si	Mn	Cr		
13,0	—	0,58	0,48	18,68	0,044	180
47,0	—	1,00	0,40	17,48	0,110	35—60
46,5	36,1	1,20	1,34	16,05	0,150	0 (трещины в шве)

стали 12Х18Н9Т иллюстрируют данные табл. 13 [2].

При сварке под плавлеными флюсами и порошковой проволокой исключение SiO_2 из шихты осуществляется сравнительно просто, как, например, в так называемых бескислородных флюсах. В случае же покрытых электродов и керамических флюсов предотвратить восстановление кремния весьма трудно, особенно при сварке легированной стали и сплавов, вследствие того, что в качестве связующего обычно применяется силикат натрия (жидкое

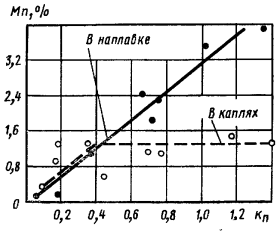


Рис. 26. Зависимость содержания марганца в каплях (○) и в наплавленном металле (●) от относительной массы покрытия

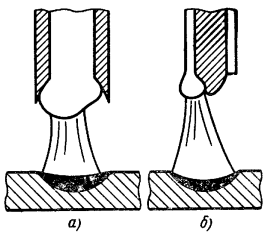


Рис. 27. Схемы контакта капли металла с шихтой при плавлении покрытого электрода (*а*) и порошковой проволоки (*б*)

стекло). Бессиликатное связующее (например, алюминат натрия) пока не получило применения (за исключением электродов для сварки алюминия) вследствие технологических трудностей. Подавление же восстановительных процессов путем создания в зоне сварки окислительных условий (как, например, на рис. 25) далеко не всегда приемлемо и этим способом следует пользоваться с большой осторожностью.

Условия контакта металла со шлаком. В уравнения кинетики (см. с. 68) входит величина поверхности F взаимодействия металла со шлаком, зависящая от условий контакта между ними. Наибольшая величина поверхности взаимодействия расплавленного металла со шлаком наблюдается при электрошлаковой сварке, когда электродный металл (проволока, лента) расположен в шлаковой ванне и вся поверхность металлической ванны контактирует со шлаком.

При сварке под флюсом поверхность F взаимодействия уменьшается вследствие того, что дуга горит в газовом пузыре и шлак частично оттесняется с поверхности ванны скоростным напором потока газов дуги.

При сварке покрытыми электродами поверхность F контакта капель электродного металла со шлаком зависит от длины втулки из нерасплавленного покрытия на конце электрода. Чем длиннее втулка, тем благоприятнее условие для контакта капель со шлаком. Однако при некоторой длине втулки (толщине покрытия) увеличение поверхности контакта прекращается, как это показывает зависимость перехода легирующих элементов из покрытия в капли от относительной массы покрытия (рис. 26).

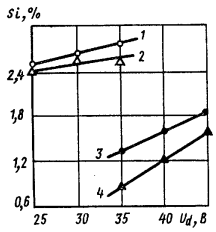


Рис. 28. Зависимость содержания кремния в наплавленном металле от напряжения (длины) дуги при сварке электродами (*1*, *2*) и порошковой проволокой (*3*, *4*). Сила тока: *1* — 150 А; *2* — 220 А; *3* — 240 А; *4* — 410 А

Условия контакта металл — шлак при сварке покрытыми электродами и порошковой проволокой различные. Если в первом случае покрытие (шлак) располагается снаружи металлического стержня и капли формируются как бы в оболочке из шлака, то в случае порошковой проволоки шихтовые материалы расположены внутри оболочки из металлической ленты и поверхность контакта металла со шлаком оказывается меньшей (рис. 27). Соответственно меньше и полнота протекания реакций между ними. Это наглядно иллюстрируется данными о переходе (восстановлении) кремния при наплавке электродами и порошковой проволокой с шихтой одинакового состава (30% плавикового шпата, 6% мрамора, 42% кварцевого песка, 15% ферромарганца, 7% алюминиевого порошка с одинаковым количеством силиката натрия) и с одинаковой относительной массой покрытия (шихты сердечника) $k_п = 0{,}7$ (рис. 28).

Подобно восстановлению кремния окислительные реакции при сварке электродами также протекают с большей полнотой по сравнению со сваркой порошковой проволокой.

Говоря о контакте между металлом и шлаком, образующимся при расплавлении сварочных материалов, необходимо отметить важную роль смачивания металла шлаком. Чем лучше смачивание, тем больше, очевидно, может быть контакт между ними.

Переход серы и фосфора из сварочных материалов в наплавленный металл. Окислительно-восстановительные реакции, рассмотренные выше, играют наибольшую роль при сварке. Но сварочные материалы наряду с окислителями могут содержать и другие компоненты, переход которых в металл так же нежелателен, как и переход кислорода. Такими компонентами являются прежде всего сера и фосфор, попадающие во флюсы (реже в покрытия) с шихтовыми материалами. Переход серы в металл тем меньше, чем выше основность шлака (за счет образования CaS, нерастворимого в стали) и чем выше концентрация марганца в металле за счет образования сульфида марганца MnS по реакции

$$[FeS] + [Mn] \rightleftarrows [Fe] + (MnS).$$

Сульфид марганца менее растворим в стали, чем сульфид железа, что вызывает перераспределение серы в сторону большего ее содержания в шлаке. Что

касается предупреждения перехода в металл из шлака фосфора, то, как известно из металлургической практики, лучшие результаты дают окислительные условия процесса. Фосфор при этом переводится в пятиокись фосфора, которая в шлаке связывается в фосфаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ерохин А. А.** Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности. М., «Машиностроение», 1973. 448 с.
2. **Любавский К. В.** Металлургия сварки стали плавлением. Справочник по сварке. Под. ред. Е. В. Соколова. Т. 1. М., Машгиз, 1960, с. 51—140.
3. **Походня И. И.** Газы в сварных швах. М., «Машиностроение», 1972. 256 с.

Глава 4

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ, ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И КРИТЕРИИ РАСЧЕТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖИМА СВАРКИ

ФАЗОВЫЕ И СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В МЕТАЛЛАХ ПРИ СВАРКЕ И УСЛОВИЯ ИХ ПРОТЕКАНИЯ

При сварке плавлением сварные соединения имеют два ярко выраженных участка: закристаллизовавшийся металл шва и зону термического влияния в основном металле. При сварке давлением в твердой фазе обнаруживается только вторая зона. При этом роль пластической деформации в формировании структуры и свойств сварных соединений настолько возрастает, что эту зону более правильно называть зоной термомеханического влияния [6, 7].

Главная особенность строения зоны термического влияния сплавов с полиморфным превращением (например, стали, сплавов циркония, титана и т. д.) заключается в том, что в ней всегда имеются участки полной и частичной перекристаллизации (*1* и *2* на рис. 1).

В участке полной перекристаллизации максимальные температуры нагрева основного металла изменяются от температуры плавления $T_{пл}$ до температуры $T_{к.\,ф.\,п}$, которая для стали соответствует концу $\alpha \rightarrow \gamma$-превращения (критическая точка Ac_3), а для сплавов титана и циркония — концу $\alpha \rightarrow \beta$-превращения. В этом участке следует выделить зону с несколькими рядами крупных зерен (*1″*), которая нагревается выше температуры $T_{н.\,и.\,р}$ — начала интенсивного роста зерна аустенита в стали или β-фазы в сплавах титана и в которой возможно частичное оплавление границ зерен. Эту зону принято называть околошовной. Кроме того, в микроскопически узких областях первого ряда зерен околошовной зоны и шва, прилегающих к «границе» сплавления основного металла со швом (*1′*), развивается химическая неоднородность (главным образом за время контакта твердого металла с жидким). Вместе эти области образуют зону химической неоднородности, роль которой оказывается особенно важной в случае разницы в композициях основного и присадочного металлов или в содержании вредных примесей.

Как правило, наиболее резкие изменения структуры и свойств основного металла происходят в околошовной зоне и в большинстве случаев оказываются решающими при оценке свариваемости данного сплава или стали (снижение пластичности и ударной вязкости вследствие роста зерна, перегрева и полной или частичной закалки; образование горячих и холодных трещин).

Основными параметрами термического цикла околошовной зоны являются максимальная температура нагрева T_{max}, близкая к $T_{пл}$, скорость нагрева $v_н$ в температурном интервале фазового превращения, длительности $t' + t''$ пребывания металла при температуре выше температуры конца фазового превращения и скорость охлаждения в температурном интервале соответствующего фазового превращения при охлаждении (рис. 1, *б*).

В участке частичной перекристаллизации (*2* на рис. 1, *а*) основной металл нагревается выше температуры $T_{н.\,ф.\,п}$, которая для стали соответствует началу превращения перлита в аустенит (критическая точка Ac_1), а для большинства сплавов титана — началу $\alpha \rightarrow \beta$-превращения. Обычно структурные изменения в этом участке по сравнению с околошовной зоной в меньшей степени показывают отрицательное влияние на свойства сварных соединений. Однако при определенных исходной структуре, а также условиях нагрева и охлаждения при сварке в этом участке возможно разупрочнение основного металла, обусловленное либо характером фазовых превращений в новых фазах, образующихся при последующем охлаждении, либо процессами возврата и коагуляции в старых фазах при нагреве.

Наличие третьего участка (*3* на рис. 1, *а*) и тип структурных изменений в нем зависят от исходного состояния основного металла перед сваркой. В случае сварки отожженного металла третий участок в зоне термического влияния практически отсутствует. При сварке стали или сплавов титана после закалки, закалки с отпуском или закалки с последующим старением, а также в нагартованном состоянии (после ковки или прокатки) в этом участке, как правило, происходит разупрочнение. В первом случае оно обусловлено процессами распада пересыщенных твердых растворов (отпуском мартенсита или старением высокотемпературных остаточных фаз) и последующей коагуляцией упрочняющих фаз (карбидов в стали и интерметаллидов и химических соединений в сплавах титана). Во втором случае к разупрочнению преимущественно приводят процессы рекристаллизации обработки. Этот третий участок принято называть участком или зоной разупрочнения,

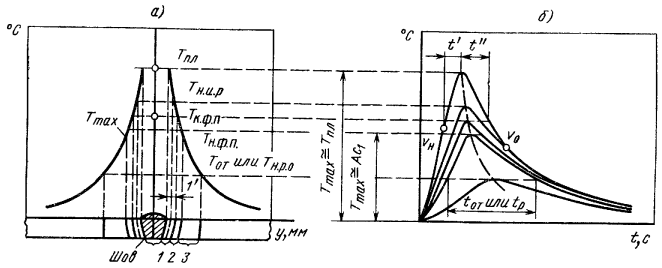


Рис. 1. Строение зон сварного соединения сплава с полиморфным превращением при однопроходной сварке плавлением листов встык:

а — распределение максимальных температур T_{max} поперек шва и соответствующие им участки зоны термического влияния; *б* — термические циклы на границах отдельных участков зоны термического влияния. Обозначения максимальных температур: $T_{пл}$ — плавления; $T_{н.и.р}$ — начала интенсивного роста зерна; $T_{н.ф.п}$ и $T_{к.ф.п}$ — соответственно начала и конца фазового превращения при нагреве; $T_{от}$ — отпуска закаленного основного металла перед сваркой; $T_{н.р.о}$ — начала рекристаллизации обработки

отпуска или рекристаллизации. Наиболее резкое разупрочнение металла обычно происходит у границы этого участка с участком неполной перекристаллизации, где максимальные температуры нагрева T_{max} близки к нижней критической точке фазового превращения $T_{и.ф.п}$. Поэтому основными параметрами термического цикла участка разупрочнения являются максимальная температура нагрева $T_{max} = T_{п.ф.п}$ и длительность $t_{от}$ (или $t_р$) пребывания металла во время сварки при температуре выше температуры отпуска $T_{от}$ (или начала рекристаллизации обработки $T_{н.р.о}$) (см. рис. 1, *б*).

Склонность основного металла к разупрочнению при сварке — в ряде случаев одна из важных характеристик свариваемости высокопрочной стали (преимущественно мартенситной) и некоторых сплавов титана. Однако при выборе технологии и режимов сварки эта характеристика является вспомогательной.

В основном свариваемость большинства материалов оценивают по изменениям фазового состава и структуры металла в околошовной зоне, от которых в наибольшей мере зависит технологическая и эксплуатационная прочность сварных соединений и конструкций. Однако в ряде случаев, особенно в сплавах без полиморфных превращений, решающее влияние на качество сварного соединения оказывают структура и свойства металла шва, а также образование в нем горячих трещин.

По термомеханическим условиям протекания фазовых превращений сварка плавлением существенно отличается от термической обработки, литья и формирования слитка.

Если при термической обработке стали температура нагрева обычно превышает точку Ac_3 не более чем на 100—150° С, то при сварке максимальные температуры нагрева околошовной зоны близки к температуре плавления. Скорости нагрева при сварке в десятки и сотни раз выше, чем при печной термической обработке. Поэтому при сварке интенсивно растет зерно аустенита, а степень его гомогенизации, как правило, невысока. Это существенно сказывается на устойчивости аустенита при охлаждении металла и температурных интервалах его превращения.

Кристаллизация сварочной ванны происходит в более неравновесных условиях, чем отливок и слитков, что связано со значительно меньшим объемом затвердевающего металла, более высокими скоростями охлаждения и существенным влиянием кромок основного металла на характер роста кристаллитов, их ориентацию, размеры и неоднородность по составу.

Развивающиеся в процессе сварки деформации, хотя и более ограничены по величине, но отличаются более высоким темпом изменения. Кроме того, из-за неравномерного нагрева поля деформаций и напряжений при сварке характеризуются более высокой неоднородностью и значительными градиентами.

КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ

Литая зона сварного соединения представляет собой металл, затвердевший на подложке, которой являются оплавленные кромки основного металла. В соответствии с теорией роста кристаллов затвердевание жидкого металла происходит путем образования новых атомных слоев твердой фазы. Эти слои сохраняют кристаллографическую ориентацию подложки. Первые кристаллиты, прорастающие от линии сплавления в глубь ванны, имеют ориентацию оплавленных рекристаллизованных зерен околошовной зоны, т. е. сильно разориентированы [4].

Число кристаллитов сварного шва на линии сплавления равно числу оплавленных рекристаллизованных зерен. Между кристаллитами формируются большеугловые границы, являющиеся продолжением границ рекристаллизованных зерен. Эти границы можно представить как поверхности раздела различно ориентированных кристаллических решеток.

Однако затвердевание сварочной ванны может происходить не только в результате развития кристаллитов от подложки в глубь ванны, но также в результате образования вблизи от края ванны слоя новых кристаллитов в связи с развитием термического или концентрационного переохлаждения. В переохлажденном слое независимо друг от друга возникают зародыши кристаллизации. Чем больше степень переохлаждения расплава, тем больше образуется зародышей кристаллизации и соответственно больше новых кристаллитов. До момента столкновения эти кристаллиты не взаимодействуют. Поэтому этот слой также характеризуется их беспорядочной ориентацией.

При сварке на больших погонных энергиях рост зерен в околошовной зоне уменьшает число затравочных зерен, и от линии сплавления в глубь ванны прорастает соответственно меньшее число кристаллитов. В этих же условиях сварочная ванна окажется менее переохлажденной, и число новых центров кристаллизации, образующих в дальнейшем слой хаотически ориентированных кристаллитов, также будет меньшим. Размер кристаллитов в краевом слое сварного шва увеличится. Могут существовать и такие условия охлаждения сварочной ванны (например, при сварке чистых металлов на малых скоростях или с сопутствующим подогревом), при которых расплавленный металл будет недостаточно переохлажден для образования у края ванны новых центров кристаллизации, и развитие получат только кристаллиты, растущие от подложки.

Скорости кристаллизации по разным кристаллографическим направлениям различны. Направлением преимущественного роста кристаллитов в металлах

с решеткой гранецентрированного или объемно-центрированного куба является ⟨100⟩, для гексагональной плотноупакованной решетки ⟨10$\bar{1}$0⟩. По мере протекания процесса затвердевания сварочной ванны растущие от края ванны кристаллиты сталкиваются и вступают во взаимодействие. Более благоприятно ориентированные кристаллиты, у которых кристаллографические направления преимущественного роста близки или совпадают с направлением теплового потока, разрастаются за счет соседних. Это происходит в результате отклонения границы между двумя кристаллитами в сторону неблагоприятно ориентированного кристаллита.

В результате конкурентного роста часть кристаллитов исчезает, поперечное сечение оставшихся кристаллитов становится больше. Поскольку новые кристаллиты не образуются (переохлаждение, необходимое для поддержания процесса зарождения новых центров кристаллизации, уже снято), ничто не препятствует дальнейшему росту кристаллитов в глубь сварочной ванны. В сварном шве возникает зона с кристаллитами избирательной ориентации, вытянутыми в направлении теплового потока подобно столбчатым кристаллитам слитков.

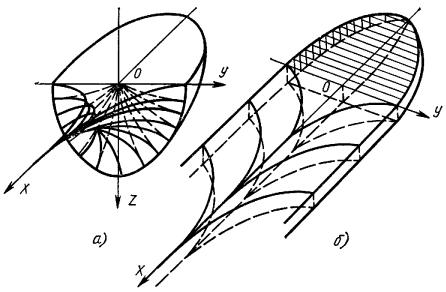


Рис. 2. Траектории роста кристаллитов в сварочной ванне при схемах кристаллизации:
а — пространственной; *б* — плоской

Во всех металлах и сплавах, кристаллизующихся в неравновесных условиях, столбчатая зона с преимущественной ориентацией образуется благодаря дендритному росту. Границы между кристаллитами, формирующиеся по мере продвижения в расплав кристаллических решеток твердой фазы, обычно также вытянуты в направлении роста. В отличие от слитков в сварных швах оси роста кристаллитов в общем случае представляют собой пространственные кривые, что обусловлено изменением формы сварочной ванны в плоскостях, параллельных плоскости свариваемого листа, и перемещением теплового поля в направлении сварки (рис. 2, *а*). При сварке тонких листов встык (рис. 2, *б*), когда сварочный источник можно считать линейным, а сварочную ванну — постоянной формы по толщине листа, пространственная схема кристаллизации сменяется плоской, т. е. криволинейные оси роста кристаллитов оказываются расположенными в параллельных плоскостях [4].

Малый объем сварочной ванны и большая кривизна оплавляемой поверхности — причина того, что столбчатые кристаллиты в сварном шве более разориентированы, чем в слитках. Так, углы разориентации между столбчатыми кристаллитами в сварных швах на листах толщиной 1—1,5 мм (плоская схема кристаллизации) составляют 5—20° [1]. При сварке с глубоким проплавлением или при наплавке, когда кривизна ванны больше, разориентация столбчатых кристаллитов может оказаться еще более заметной.

С целью повышения технологической прочности и пластичности соединений стремятся подавить образование в сварных швах крупнозернистой столбчатой структуры. Это достигается:

введением в металл шва в достаточных концентрациях элементов, способствующих образованию высокотемпературных избыточных фаз типа твердого раствора (например, ферритной фазы в швах аустенитной стали), эвтектик (например, в швах из сплавов алюминия с кремнием, медью и т. п.), первичных карбидов (например, карбидов ниобия; ниобиевой карбидно-аустенитной эвтектики в швах аустенитной стали типа Х13Н18, Х15Н25, Х15Н35 и никелевых сплавов) или первичного графита и др.;

введением в сварочную ванну модификаторов в виде твердых частиц тугоплавких металлов или соединений (например, молибдена и титана при сварке цветных сплавов) либо поверхностно-активных элементов (например, стронция и церия при сварке никелевых сплавов, аустенитной стали и пр.);

воздействием на сварочную ванну ультразвуковых колебаний или механических вибраций.

Все эти меры направлены к тому, чтобы создать перед фронтом растущих столбчатых кристаллитов новые центры кристаллизации, подавив тем самым их дальнейший рост.

В центре сварных швов сплавов часто появляется зона равноосных кристаллитов, свидетельствующая о развитии в этой части сварочной ванны концентрационного переохлаждения и присутствии инородных частиц, действующих как катализаторы зарождения. Кристаллиты этой зоны зарождаются в объеме расплава независимо от уже существующего фронта кристаллизации и ориентированы хаотично.

Таким образом, литая зона сварного шва представляет собой поликристаллический агрегат, состоящий из сильно разориентированных кристаллитов с большеугловыми границами между ними. Внутри кристаллитов наблюдаются некоторые отклонения в ориентации от главного направления роста вследствие образования ячеистой субструктуры, однако эти отклонения не могут превышать нескольких градусов.

Внутрикристаллическое строение металла сварных швов характеризуется структурами трех видов — ячеистой, дендритной и смешанной, которые отличаются друг от друга степенью развития ликвации легирующих элементов и дисперсностью их распределения. При рассмотрении особенностей формирования ячеистой и дендритной неоднородностей основываются как на общей термодинамической теории, определяющей условия равновесия между жидкой и твердой фазами в соответствии с типом диаграмм состояния сплавов, так и на кинетической теории, устанавливающей степень неравновесности процесса, исходя из взаимодействия тепловых и диффузионных потоков при кристаллизации [1].

В процессе кристаллизации сплавов прилегающие к твердому металлу слои жидкой фазы обогащаются растворенными элементами, имеющими более низкую температуру плавления. Если в результате диффузионных процессов или воздействия конвекционных потоков жидкости растворенный элемент будет отводиться от поверхности раздела в жидкую фазу, то вследствие стремления системы к равновесию часть атомов жидкой фазы будет переходить в твердую фазу, восстанавливая пограничные концентрации и обеспечивая рост кристаллов твердого раствора. Чем интенсивнее отводится растворенный элемент от поверхности раздела в жидкую фазу, тем быстрее происходит рост твердой фазы. Подобный процесс принято называть избирательной или диффузионной кристаллизацией. Рост кристаллов при избирательной кристаллизации лимитируется скоростью диффузионных процессов в жидкой фазе. Процессы диффузии в твердой фазе имеют при этом второстепенное значение.

При кристаллизации чистых металлов состав твердой фазы не отличается от состава исходной жидкой. В этом случае для роста кристаллов твердой фазы не требуется перераспределения состава между фазами. Такой процесс кристаллизации называется бездиффузионным.

Однако процесс бездиффузионной кристаллизации возможен не только в чистых металлах, но и в сплавах, образующих непрерывный ряд твердых растворов,

а также и в эвтектических сплавах, но наиболее часто она проявляется в сплавах составы которых значительно отличаются от эвтектического.

Форма фронта кристаллизации и структур твердой фазы зависит от условий охлаждения при затвердевании. При отсутствии в расплаве переохлаждения рост кристаллов твердой фазы контролируется процессами переноса, иными словами, скоростью отвода примесей и скрытой теплоты превращения от фронта кристаллизации. В этих условиях поверхность раздела фаз гладкая (если пренебречь шероховатостью, образованной ступенями и террасами) и занимает положение изотермы кристаллизации.

Однако в реальных условиях затвердевания расплав перед фронтом кристаллизации оказывается переохлажденным. В присутствии слоя переохлажденного расплава гладкая поверхность раздела фаз становится неустойчивой и сменяется поверхностью с выступами. Переохлаждение, обеспечивающее ускоренный рост выступов,

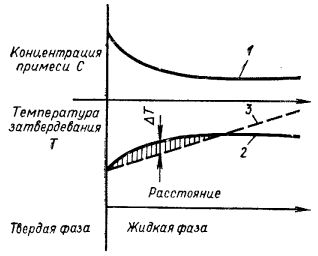


Рис. 3. Схема образования в расплаве перед фронтом кристаллизации области концентрационного переохлаждения:

1 — состав расплава; *2* — температура ликвидуса; *3* — фактическая температура; ΔT — величина переохлаждения

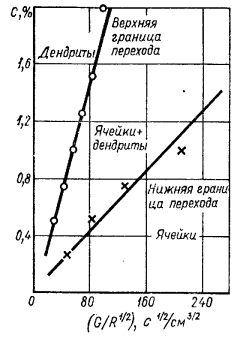


Рис. 4. Критические условия затвердевания, при которых ячеистая форма кристаллизации переходит в дендритную (сплав олова со свинцом)

может быть двоякого рода — термическим и концентрационным. В условиях термического переохлаждения проходит дендритная кристаллизация сверхчистых металлов, а также начинается кристаллизация сплавов. Выделяющаяся при этом скрытая теплота постепенно снимает начальное термическое переохлаждение. Будет ли расплав термически переохлажден на более поздних стадиях затвердевания, зависит от геометрии изложницы или сварочной ванны и внешних условий, определяющих теплоотвод.

В слое жидкости перед фронтом кристаллизации возникает градиент концентрации растворенного компонента — положительный или отрицательный — в зависимости от того повышает или понижает этот компонент температуру кристаллизации. Градиенту концентрации соответствует определенный градиент температур ликвидуса (рис. 3). Однако фактическая температура расплава, зависящая от установившихся условий кристаллизации, может не совпадать с равновесной температурой и быть ниже последней.

Перед фронтом кристаллизации появляется область концентрационного переохлаждения, обусловленная изменением состава расплава. Чем больше концентрация примеси и меньше температурный градиент в расплаве, тем шире область концентрационного переохлаждения; ширина этой области обычно 1 (10^{-2} — 10^{-4}) см [1]. При наличии концентрационного переохлаждения всякий

участок поверхности фронта кристаллизации, выдавшийся вперед, оказывается в более благоприятных для роста условиях, чем соседние. На гладкой поверхности раздела фаз появляются выступы. Боковые диффузионные потоки, возникающие в расплаве около выступов, обедняют примесями вершины выступов и обогащают боковые грани. Такое распределение концентраций формирует в твердой фазе гексагональную ячеистую структуру, состоящую из параллельных элементов (ячеек), вытянутых в направлении кристаллизации. Границы ячеек образованы скоплением примеси у боковых стенок выступов.

Критическое состояние, при котором осуществляется переход от плоского фронта кристаллизации к ячеистому, определяется условием равенства градиентов фактической температуры расплава и ликвидуса, которое устанавливает линейную связь между начальной концентрацией примеси Co и отношением градиента температуры G в расплаве у фронта кристаллизации к скорости R роста кристаллов.

В сплаве определенного состава образование ячеек можно подавить замедлением скорости роста или же повышением температурного градиента.

Продвигаясь в расплав, ячейки укрупняются, так как расширяется область концентрационного переохлаждения и уменьшается скорость кристаллизации. При достаточно большой протяженности зоны переохлажденного расплава на ячейках появляются ветви второго порядка, характерные для дендритного роста. Как видно из рис. 4, дендритному росту способствуют большие концентрации примесей, большие скорости кристаллизации и малые температурные градиенты. За счет преимущественного разрастания дендритов, ориентированных по тепловому потоку, в литом металле формируется волокнистая текстура.

Изменение размеров дендритов в зависимости от условий кристаллизации аналогично изменению размеров ячеек, т. е. с продвижением фронта твердой фазы в расплав дендриты увеличиваются. При этом общее количество примеси, сегрегировавшей в междуосных пространствах дендритов, уменьшается, а концентрация примеси в расплаве перед фронтом возрастает. На некоторой стадии роста столбчатых дендритов весь оставшийся расплав оказывается настолько концентрационно переохлажденным, что в нем зарождаются новые кристаллы. Последующий быстрый рост этих кристаллитов в радиальных направлениях предотвращает дальнейшее развитие столбчатых дендритов. Таким образом, в центре слитков и сварных швов формируется равноосная структура.

При обсуждении механизма образования ячеисто-дендритных структур обычно рассматривают системы типа твердых растворов. Однако подобные же структуры обнаруживаются и в сплавах с эвтектическим типом диаграммы состояния неэвтектического состава. Вначале затвердевание таких сплавов происходит с образованием ячеисто-дендритной структуры. При достижении расплавом перед фронтом кристаллизации эвтектического состава в междендритных пространствах и по границам кристаллитов образуется эвтектика.

Исключительно многофазная кристаллизация характерна для сплавов эвтектического состава. Существует множество структурных разновидностей, единственной общей чертой которых является наличие двух фаз или более. Если при эвтектической кристаллизации первичная фаза облегчает зарождение вторичной, то образуются пластинчатая структура или — в присутствии примесей — ее модификации: колонийная и стерженьковая структуры. В противном случае образуются несплошные эвтектики с беспорядочной ориентацией второй фазы.

Ячеистые, дендритные, а также смешанные — ячеисто-дендритные структуры характерны для внутрикристаллического строения сварных швов технически чистых металлов, сплавов, образующих непрерывный ряд твердых растворов, а также большого числа сплавов с эвтектическим типом диаграммы состояния (рис. 5).

Ячейки появляются не от самой границы оплавления рекристаллизованных зерен околошовной зоны, а на некотором расстоянии от нее, необходимом для образования концентрационного переохлаждения. Скрытая теплота кристаллизации и теплоотвод в твердую фазу уменьшают градиент температур к центру шва. Одновременно возрастает концентрация примеси перед фронтом кристаллизации.

Следствием этого является расширение зоны концентрационного переохлаждения и увеличение размера ячеек. На некоторой, более поздней стадии затвердевания ячейки разветвляются — ячеистый рост сменяется дендритным. Ячейки и дендриты в сварных швах, как и в слитках, характерны для зоны столбчатых кристаллитов, дендриты — преимущественно для центральной зоны равноосных кристаллитов. Однако по сравнению со слитками и крупными отливками при сварке в силу более резкого теплоотвода область существования ячеистых и смешанных структур шире, при этом величина ячеек меньше и дисперсность участков обогащения примесью выше.

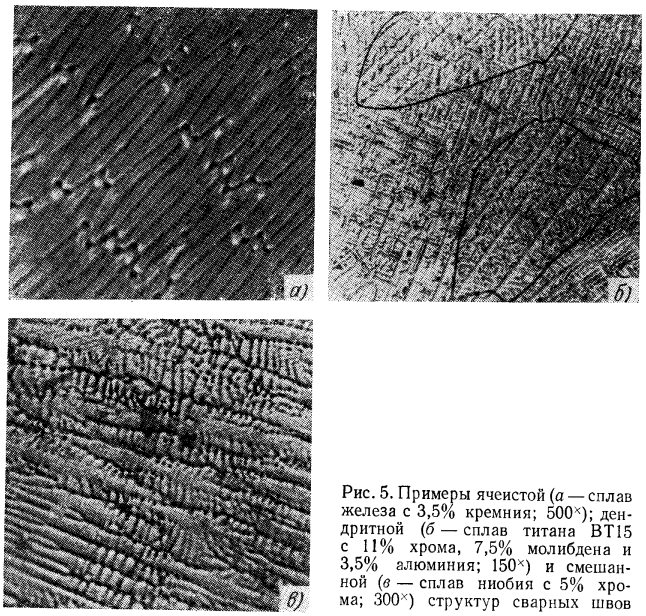


Рис. 5. Примеры ячеистой (*а* — сплав железа с 3,5% кремния; 500×); дендритной (*б* — сплав титана ВТ15 с 11% хрома, 7,5% молибдена и 3,5% алюминия; 150×) и смешанной (*в* — сплав ниобия с 5% хрома; 300×) структур сварных швов

В результате перераспределения примесей при затвердевании литые структуры оказываются химически неоднородными. Сегрегацию примесей, образовавшуюся при затвердевании, можно разделить на несколько видов. В макроскопическом масштабе развивается нормальная сегрегация, или увеличение концентрации примеси в направлении затвердевания. С увеличением протяженности зоны затвердевания роль нормальной сегрегации становится все более важной. В сварных швах сегрегация этого вида выражена менее заметно, чем в слитках. Нормальная сегрегация проявляется не только в объеме всего литого металла, но и в каждом отдельном кристаллите, а именно: часть кристаллита, затвердевающая в первую очередь, содержит меньше примеси, чем часть, затвердевающая позже. Наибольшее количество примеси скапливается в центре

слитков или сварных швов, где встречаются растущие навстречу друг другу кристаллиты.

Межзеренная сегрегация, или скопление примеси у межзеренных границ, связана с образованием канавки на фронте кристаллизации в месте выхода к фронту границы между растущими бок о бок кристаллитами. Механизм обогащения границы примесью такой же, как и при образовании границ ячеек.

В неравновесных условиях затвердевания внутри кристаллитов образуется ячеистая или дендритная сегрегация. Этот вид химической неоднородности обусловлен соответствующими формами роста кристаллов. Исследования с применением радиоактивных изотопов показывают, что в условиях развития ячеистой и дендритной кристаллизации сегрегация примесей в пограничных зонах ячеек и междуосных пространствах дендритов примерно равна сегрегации по границам кристаллитов. Преимущественного обогащения примесью границ между соседними кристаллитами не обнаружено.

Степень развития ячеисто-дендритной неоднородности определяется составом сплавов и условиями затвердевания. При сварке внутрикристаллическая неоднородность в подавляющем большинстве случаев проявляется менее заметно, чем при кристаллизации слитков и отливок (даже в металлической изложнице). В слитках и отливках в зоне столбчатых кристаллитов, охлаждаемой наиболее быстро, ячеисто-дендритная сегрегация развита слабее, чем в зоне равноосных кристаллитов, которая охлаждается более медленно.

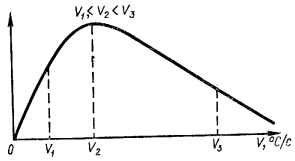


Рис. 6. Влияние скорости v охлаждения сплава при кристаллизации на степень проявления внутрикристаллической ликвации

Качественный анализ зависимости внутрикристаллической неоднородности от скорости охлаждения при кристаллизации показал, что при небольших скоростях охлаждения увеличение интенсивности охлаждения до определенного предела приводит к усилению внутрикристаллической сегрегации в соответствии с диффузионным механизмом кристаллизации. С дальнейшим увеличением скорости охлаждения внутрикристаллическая сегрегация уменьшается вследствие того, что диффузионный механизм кристаллизации сменяется бездиффузионным. Таким образом, зависимость внутрикристаллической неоднородности от скорости охлаждения выражается кривой с максимумом (рис. 6). На основании принятой схемы уменьшение внутрикристаллической сегрегации в швах по сравнению со слитками и в зоне столбчатых кристаллитов по сравнению с зоной равноосных кристаллитов объясняли сменой диффузионного механизма кристаллизации на бездиффузионный.

Однако исследования последнего времени показали, что в диапазоне скоростей охлаждения от нескольких градусов до сотен градусов в секунду, т. е. реальных скоростей охлаждения слитков и сварных швов, бездиффузионный механизм кристаллизации не осуществляется. Состав осей и пограничных зон ячеек и дендритов остается при этих скоростях неизменным и определяется приблизительно положением солидуса при соответствующей температуре затвердевания. Уменьшение степени химической неоднородности с увеличением скоростей охлаждения связано с измельчением элементов ячеисто-дендритной структуры, в результате которого состав литого металла усредняется. При малых скоростях охлаждения ячеисто-дендритная сегрегация убывает вследствие выравнивающей диффузии в твердой фазе непосредственно при кристаллизации, а также в ходе остывания после затвердевания.

Еще один вид микроскопической сегрегации — обратная сегрегация — проявляется на последних стадиях затвердевания, когда обогащенная примесью жидкая

фаза устремляется в межячеистые или междуосные промежутки, где в результате затвердевания произошла усадка.

Помимо названных видов сегрегаций, в макрообъемах сварных швов наблюдается распределение примесей слоями, расположенными эквидистантно поверхности оплавления. Это явление вызвано изменением скорости роста кристаллитов вследствие неравномерного поступления теплоты в сварочную ванну, периодически нарушающей баланс поступления и отвода теплоты и изменяющей скорость охлаждения. При этом возможны остановка процесса кристаллизации и даже частичное оплавление фронта твердой фазы.

Слои с повышенным содержанием примеси хорошо заметны в металле шва при дуговой сварке плавящимся электродом и обусловлены каплеобразным поступлением электродного металла, неравномерной толщиной слоя покрытия электродов или флюса и т. д. При автоматических способах сварки и наплавки, когда жидкая ванна имеет большой объем, слои расположены главным образом вблизи границы сплавления, а при ручной сварке, когда ванна сравнительно малого объема, — по всему сечению шва. Еще более ярко слоистость в строении металла шва выражена при использовании импульсных источников теплоты (например, сварка электронным лучом в импульсном режиме), когда происходит прерывистое плавление и затвердевание. Слоистость не нарушает характера и направления кристаллизации, так как даже в случае периодического оплавления фронта твердой фазы поверхности нерасплавившихся частей кристаллитов служат двухмерными зародышами, обеспечивающими рост кристаллитов с прежней кристаллографической ориентировкой.

Одним из наиболее опасных дефектов сварного шва и прилегающей к нему зоны частичного расплавления основного металла являются горячие трещины, образующиеся по границам кристаллитов на завершающем этапе затвердевания (кристаллизационные трещины) или ниже температуры солидуса при последующем охлаждении (подсолидусные трещины). В связи с этим принципиальное значение имеет механизм формирования границ зерен в литых металлах.

В течение всего периода роста кристаллиты сохраняют начальную кристаллографическую ориентацию, за исключением незначительных искажений, возникающих вследствие механической деформации дендритов или формирования внутрикристаллической ячеистой или полосчатой субструктуры.

По этой причине при затвердевании поликристаллов в твердой фазе непосредственно за фронтом кристаллизации возникают границы зерен (границы кристаллитов) представляющие собой зону перехода между различно ориентированными кристаллическими решетками. Ширина этой зоны — порядка межатомных расстояний.

В общем случае границы кристаллитов в литом металле являются большеугловыми, т. е. образованы сильно разориентированными решетками. Исключение составляют границы в столбчатой зоне, где вследствие развития преимущественной ориентации смежные кристаллиты оказываются слабо разориентированными (в сварных швах 5—20°). В условиях гладкого фронта кристаллизации межзеренные границы в столбчатой зоне почти перпендикулярны поверхности раздела между твердой и жидкой фазами. При дендритной кристаллизации направление границ между столбчатыми кристаллитами определяется условиями конкурентного роста. В замороженной зоне у края слитка или у границы оплавления сварного шва, а также в центральной части литой зоны направление границ кристаллитов беспорядочное.

В условиях ячеисто-дендритной кристаллизации соседние кристаллиты стыкуются стенками ячеек. Следовательно, вдоль стенок ячеек, принадлежащих разным кристаллитам, должны проходить границы между кристаллитами.

Такие границы обладают большой нестабильностью вследствие развитой поверхности и случайной ориентации и за время охлаждения литого металла после затвердевания смещаются в новые, более равновесные положения — с меньшей свободной энергией и площадью поверхности (рис. 7). Миграция границ кристаллитов происходит в интервале температур высокой диффузионной подвижности атомов ($T_{\text{солидуса}} - T_{\text{рекристаллизации}}$) и контролируется граничной диффузией [1].

Скорость миграции границ во много раз выше скорости диффузии в решетке. В связи с этим сетка границ зерен оказывается смещенной по отношению к ячеисто-дендритным сегрегациям. Итак, несовпадение сетки границ зерен в металле шва с формой ячеек и дендритов обусловлено подсолидусной миграцией границ из своих исходных неравновесных положений в более равновесные.

Одновременно с миграцией большеугловых границ формируется субструктура сплавов (блоки, субзерна). Она возникает вследствие высокого пересыщения литого металла вакансиями и осуществляется по механизму полигонизации (переползание дислокаций, рост и коалесценция блоков). Однако ни переползание дислокаций, ни рост и коалесценция блоков и субзерен не могут обеспечить получения макроскопической сетки большеугловых границ [1]. Наиболее полно полигонизация происходит в тех случаях, когда литой металл охлаждается с малыми скоростями или подвергается последующему высокотемпературному отжигу. Но и тогда блоки на один-два порядка меньше кристаллитов, разориентация блоков не превышает нескольких угловых минут, а субграницы выявляются в виде цепочек, состоящих из отдельных фигур травления.

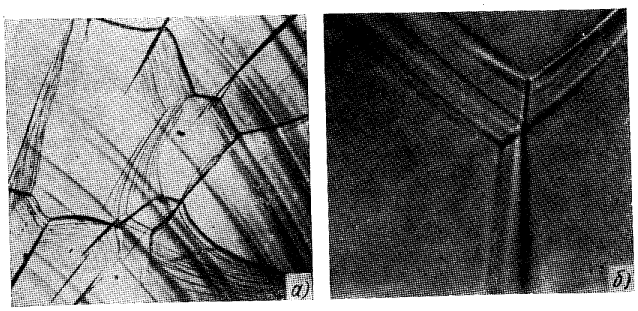


Рис. 7. Миграция границ зерен в сварных швах ниобия:
а — 500×; *б* — 300×

В макроскопическом аспекте современные количественные методы оценки условий образования горячих трещин (технологической прочности) основаны на сопоставлении темпа нарастания деформаций с изменением деформационной способности металла шва в процессе его затвердевания и последующего охлаждения (методы ИМЕТ-2, ИМЕТ-ЦНИИЧМ и ЛТП) [1, 4, 5]. Критерием оценки служит критическая скорость деформации образцов при растяжении или изгибе в процессе их сварки или в условиях имитации сварочных термических циклов. В микроскопическом аспекте эти оценки основаны на принятых в теории межкристаллического разрушения механизмах, в которых ведущую роль играет процесс межзеренного проскальзывания. При формировании кристаллизационных трещин межзеренное проскальзывание, развивающееся за счет действия внутренней усадки и внешних сил, инициирует разрушение по жидким межкристаллическим прослойкам в основном на поперечных по отношению к действующим напряжениям границах зерен. При формировании подсолидусных трещин межзеренное проскальзывание, раскрывая ступеньки в границах и уже существующие микрополости, облегчает процесс роста зародышевых трещин вакансионным путем по механизму диффузионной пол-

зучести. При этом трещины возникают на границах, по которым идет проскальзывание [1].

Процесс подсолидусного межкристаллического разрушения облегчается при наличии примесей по границам зерен. Сегрегация примесей уменьшает межзеренное сцепление, снижает величину поверхностной энергии образующейся полости. Если границы зерен в литом металле мигрируют с большой скоростью, то полости быстро заполняются, а ступеньки по границам сглаживаются. Такой металл не склонен к межкристаллическому разрушению. При легировании сплавов протекают два встречных процесса: с одной стороны, добавки легирующих элементов уменьшают скорость миграции границ и тем самым увеличивают опасность зарождения горячих трещин; с другой стороны, легирование элементами, образующими высокотемпературную вторую фазу или повышающими энергию активации диффузии в твердом растворе, уменьшает скорость выделения вакансий по границам или способствует созданию неровных, фрагментарных границ, по которым межзеренное проскальзывание затруднено и зародышевые трещины не образуются. Соотношение этих факторов можно представить в виде схемы (рис. 8), где область составов сплавов с низкой технологической прочностью ограничена, с одной стороны, концентрацией легирующих добавок, при которой скорость миграции границ зерен больше скорости межзеренного проскальзывания; с другой стороны, — минимальным значением скорости межзеренного проскальзывания, обеспечивающим зарождение горячей трещины.

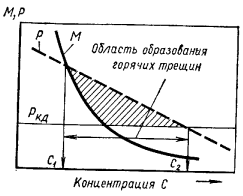


Рис. 8. Зависимость сопротивления образованию подсолидусных трещин при сварке от состава сплавов:

C — концентрация легирующего элемента; *M* — миграция границы зерна; *P* — межзеренное проскальзывание

Предупреждению горячих трещин обоих типов способствуют все рассмотренные ранее методы подавления формирования крупнозернистой столбчатой структуры, а также повышение чистоты сплавов по вредным примесям, вызывающим образование при кристаллизации легкоплавких эвтектик в низколегированных сплавах, состав которых далек от эвтектического и, наоборот, увеличение легирующих элементов в сплавах, близких к эвтектическим. Однофазные сплавы, в которых наиболее часто образуются подсолидусные трещины, рекомендуется легировать элементами, снижающими диффузионную подвижность атомов в решетке или способствующими созданию границ зерен фрагментарного строения [1].

Из технологических и конструктивных факторов наиболее эффективными в этом отношении являются выбор геометрии ванны и шва с коэффициентами формы, близкими к единице; применение теплоотводящих подкладок и накладок с целью максимальной разориентации роста кристаллов; уменьшение объема ванны за счет ограничения тока; применение импульсных методов сварки.

ПРОЦЕССЫ В ОКОЛОШОВНОЙ ЗОНЕ

При сварке плавлением сплавов полиморфных металлов в околошовной зоне последовательно протекают процессы фазовой перекристаллизации при нагреве, роста зерна и гомогенизации высокотемпературной фазы и последующее ее превращение при охлаждении.

Рассмотрим эти процессы на примере конструкционной стали и сплавов титана.

С увеличением скорости нагрева температуры фазовой перекристаллизации стали (Ac_1 и Ac_3) постепенно повышаются, а интервал Ac_1—Ac_3 расширяется (рис. 9) Чем выше температура конца превращения перлита $Ac_{1к}$ и феррита $Ac_{3к}$

в аустенит, тем мельче начальное зерно аустенита и выше температура начала интенсивного роста зерна. В стали, легированной карбидообразующими элементами, температура Ac_3 повышается в большей степени, а рост зерна начинается при более высоких температурах, чем в стали с малым количеством этих элементов.

Наиболее интенсивный рост зерна аустенита в околошовной зоне происходит в период нагрева при температурах, близких к T_{max} сварочного цикла. При нагреве рост зерна не заканчивается; он продолжается и при охлаждении, но с меньшей интенсивностью.

Однако, поскольку длительность пребывания металла околошовной зоны выше Ac_3 при охлаждении t'' в условиях однопроходной сварки обычно на порядок больше длительности при нагреве t', то влияние t'' на размер зерна часто более существенно (особенно при сварке стали средней толщины, рис. 10).

Степень гомогенизации аустенита зависит от тех же параметров термического цикла сварки (T_{max}, t' и t''). Увеличение t' и t'' повышает степень гомогенизации.

При ручной и автоматической дуговой сварке стали небольшой толщины (до 10 мм), несмотря на высокие скорости нагрева и относительно малые величины $t' + t''$ (менее 20 с), уже происходит заметный рост зерна аустенита, однако степень его гомогенизации мала (рис. 11). Вследствие того, что при автоматической сварке под флюсом стали средней толщины (15—25 мм) величины t' и t'' большие (30—100 с), зерно аустенита значительно увеличивается; одновременно повышается и степень его гомогенизации. Электрошлаковая сварка стали большой толщины (100—200 мм) характеризуется весьма длительным пребыванием металла околошовной зоны выше Ac_3 ($t' + t'' = 600 \div 2000$ с). В этих условиях гомогенизация аустенита достаточно высока, а размеры зерен приближаются к предельным значениям, соответствующим изотермическому росту при температуре, близкой к T_{max} сварочного цикла.

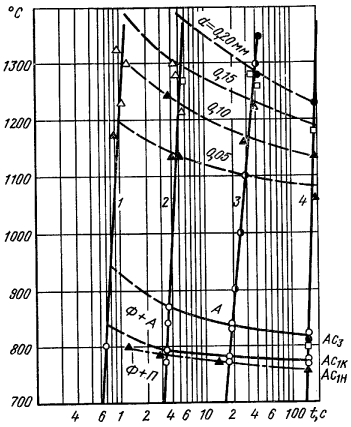


Рис. 9. Диаграмма анизотермического превращения стали 45 при нагреве:

А — аустенит; *Ф* — феррит; *П* — перлит, *d* — диаметр зерна

Кинетику превращения аустенита в процессе непрерывного охлаждения при сварке наиболее правильно характеризовать на основе анализа диаграмм анизотермического превращения.

Однако такие диаграммы, построенные применительно к условиям термической обработки, особенно в случае невысокой температуры аустенизации и больших выдержек, не могут быть использованы для разработки технологии сварки без существенных коррективов. На рис. 12 и 13 показана разница в устойчивости аустенита при сварке и термической обработке в зависимости от условий нагрева.

При сварке углеродистой и низколегированной стали без сильных карбидообразующих элементов вследствие интенсивного роста зерна устойчивость аустенита увеличивается что выражается в смещении превращения в сторону меньших скоростей охлаждения. Например, у стали 23Г (см. рис. 12) это смещение велико

из-за большой разницы в температурах аустенизации в случае сварки и термической обработки (1350 и 900° С). Количественно это можно характеризовать снижением значений скоростей охлаждения, соответствующих 100 и 50% мартенсита и появлению феррита в структуре. Для стали 23Г эти скорости охлаждения снижаются соответственно на 65, 22 и 23° С/с.

Неполная гомогенизация аустенита в стали этого типа при сварке сказывается на повышении температуры начала образования феррита, перлита и промежуточных структур. Так, у стали 45 температура образования феррита повышается на 50° С, а у стали 23Г — на 20°.

При сварке стали 40Х (см. рис. 13) относительное повыше-

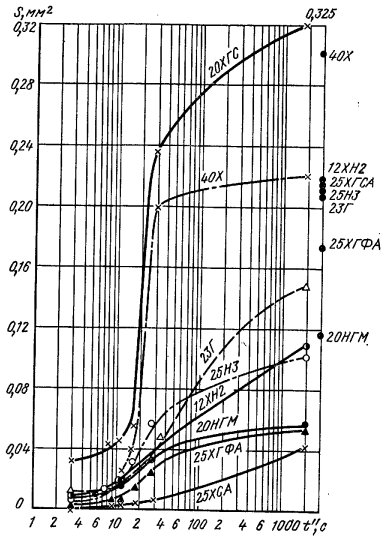


Рис. 10. Размер зерна (площадь) аустенита стали ряда марок в зависимости от длительности t'' пребывания околошовной зоны выше Ac_3 при охлаждении (T_{max} = 1350 °С; t' = 1,5 с; на оси ординат справа кружками указан предельный размер зерна в условиях изотермической выдержки при 1350 °С)

ние устойчивости аустенита вследствие роста зерна обнаруживается только в случае режимов с медленным охлаждением в области частичной закалки. Наоборот, в условиях быстрого охлаждения устойчивость аустенита снижается, так как из-за неполного растворения карбидов и очень малой степени гомогенизации аустенита

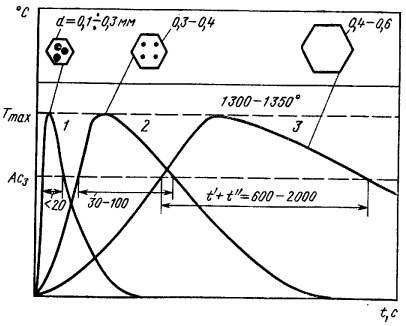


Рис. 11. Схема изменения размера зерна и степени гомогенизации аустенита по углероду при однопроходной дуговой и электрошлаковой сварке:

1 — ручная и автоматическая сварка стали толщиной до 10 мм, размер зерна 0,1—0,3 мм; *2* — автоматическая сварка под флюсом стали толщиной 15—25 мм, размер зерна 0,3—0,4 мм; *3* — электрошлаковая сварка стали толщиной 100—300 мм, размер зерна 0,4—0,6 мм

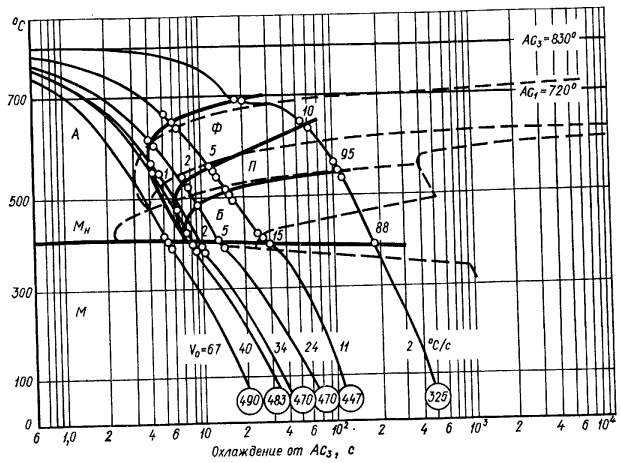


Рис. 12. Диаграммы анизотермического превращения аустенита стали 23Г в условиях сварки при T_{max} = 1350° С и скорости нагрева $v_н$ = 300° С/с (сплошные линии — данные ИМЕТ) и термообработки при $T_н$ = 900° и $t_в$ = 5 мин (штриховые линии — данные Вефера и Розе):

А — аустенит, *Ф* — феррит, *П* — перлит, *Б* — бейнит (цифры в кружках обозначают твердость по Виккерсу)

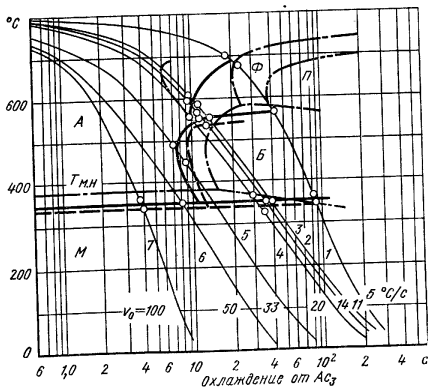


Рис. 13. Диаграммы анизотермического превращения аустенита стали 40Х в условиях сварки (T_{max} = 1350° С) при скоростях нагрева $v_н$ = 10° С/с (сплошные линии — данные ИМЕТ) и 300° С/с (штриховые линии — данные ИМЕТ) и в условиях термообработки при $T_н$ = = 840 °С, $t_в$ = 8 мин (штрихпунктирные линии — данные Вефера и Розе)

твердый раствор оказывается сильно обедненным углеродом (при этих режимах рост зерна в стали 40Х ограничен). На диаграмме анизотермического превращения области образования феррита и промежуточных структур сдвинуты в сторону больших скоростей охлаждения, причем тем резче, чем выше скорость нагрева. Полностью мартенситная структура образуется при скорости охлаждения 36° С/с, т. е. в 1,6 раза большей, чем при термической обработке (22° С/с).

Следовательно, в условиях сварки наблюдаются две противоположные тенденции: высокая температура нагрева металла в околошовной зоне способствует росту зерна, особенно при длительном пребывании металла выше Ac_3 и увеличивает устойчивость аустенита; быстрый нагрев и малое время пребывания выше Ac_3 понижают степень гомогенизации и уменьшают устойчивость аустенита. Для стали без карбидообразующих элементов или с малым их содержанием характерна первая тенденция, что приводит к смещению области частичной закалки в сторону меньших скоростей охлаждения. В стали, легированной карбидообразующими элементами, возможен противоположный результат вследствие проявления второй тенденции.

Исследования, проведенные на стали [6], показали, что типичное для сварки противоположное влияние роста зерна и неполноты гомогенизации аустенита на устойчивость его при непрерывном охлаждении особенно резко проявляется в случае однопроходной сварки листов толщиной 10—20 мм или наплавки на эти листы при относительно высоких значениях погонной энергии дуги (5—10 ккал/см и выше). Кроме того, при этих режимах начинают достаточно четко выявляться особенности стали в отношении роста зерна при сварке и в то же время еще сохраняется относительно высокая степень неоднородности аустенита. В связи с этим при построении большинства диаграмм превращения аустенита при непрерывном охлаждении (анизотермические или термокинетические диаграммы) в качестве стандартных целесообразно принимать скорости нагрева 150—250° С/с, так как они отвечают указанным выше условиям. Для сплавов титана по тем же соображениям, а также с учетом того, что наиболее широко применяются листовые материалы толщиной 1—8 мм, скорость нагрева принимают равной 250—350° С/с, что соответствует режимам однопроходной сварки титана толщиной 3—5 мм.

В соседних с околошовной зоной участках полной перекристаллизации у стали с сильными карбидообразующими элементами, как и у углеродистой и низколегированной стали без таких элементов, устойчивость аустенита определяется степенью его неоднородности: по мере удаления от околошовной зоны содержание мартенсита в структуре падает, а феррита — возрастает.

Кинетика фазовых превращений и изменений структуры и свойств при сварке стали показаны на рис. 14.

Диаграммы превращения I типа ($v_ф > v_п$) и II типа ($v_ф = v_п$) с температурными областями диффузионных превращений, не отделенными от областей промежуточного и мартенситного превращений, характерны для исследованной углеродистой и низколегированной стали различных марок. В стали, в частности типа «хромансиль», с увеличением содержания углерода происходит резкое повышение устойчивости аустенита. Сталь 40Х практически во всем диапазоне скоростей охлаждения при сварке имеет структуру мартенсита с остаточным аустенитом. Так же ведет себя и более высокопрочная сталь типа 45ХНМТА, 40ХГСНМТА и др.

Диаграммы III типа с разделенными областями превращений характерны в основном для стали с повышенным содержанием хрома (2—3%). При низком содержании углерода в стали этой системы легирования (например, 0,14% С в стали 18Х2ВФ) отчетливо очерчивается область выделения избыточного феррита, а область бейнитного превращения резко сдвигается в сторону малых скоростей охлаждения.

Существенное влияние на свойства сварных соединений закаливающей стали и образование в ней холодных трещин оказывает состояние мартенсита в околошовной зоне. В стали, у которой мартенситное превращение происходит при положительных температурах, в условиях сварки при данной мгновенной температуре

количество образующегося мартенсита тем выше, чем быстрее идет охлаждение [6]. С уменьшением скорости охлаждения интенсивность превращения уменьшается. Когда бейнитное превращение либо совсем не происходит, либо развивается очень ограниченно, основной причиной задержки мартенситного превращения является термическая стабилизация аустенита. При меньших скоростях охлаждения возможно действие фазового наклепа аустенита, возникающего вследствие бейнитного превращения. При большом количестве бейнита фазовый наклеп вызывает механическую стабилизацию аустенита, которая наряду с термической стабилизацией задерживает мартенситное превращение, и количество остаточного аустенита возрастает.

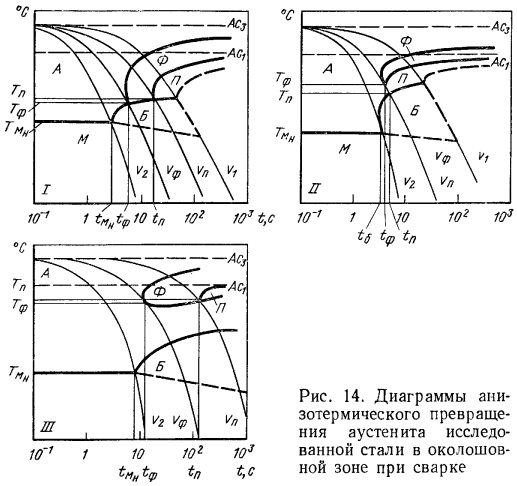


Рис. 14. Диаграммы анизотермического превращения аустенита исследованной стали в околошовной зоне при сварке

Активизирующее влияние фазового наклепа аустенита в процессе превращения с образованием малого количества бейнита подобно аналогичному влиянию характерной для условий сварки малой пластической деформации аустенита (0,5—2%) или эффекту автокаталитического действия фазового наклепа в процессе самого мартенситного превращения на ранних его стадиях.

Важно отметить, что резкое падение пластичности стали в процессе непрерывного охлаждения начинается при температурах, когда количество еще непревращенного аустенита становится меньше 50%. Выше этой температуры сталь сохраняет высокую пластичность.

Чем меньше скорость охлаждения, тем в более широком интервале температур сохраняется высокая способность стали к пластической деформации. Увеличивается также и время, в течение которого возможна релаксация напряжений первого и второго рода благодаря деформации аустенита.

Для сплавов титана диаграммы анизотермического превращения могут быть разделены на четыре типа соответственно для четырех групп сплавов с возрастающей степенью легирования элементами, стабилизирующими β-фазу (рис. 15).

Диаграммы I типа характерны для технического титана (ВТ1, ИМП1А), его α-сплавов с алюминием (сплав с 3,7% Al, ВТ5) и оловом (ВТ5-1), а также

α + β-сплавов при содержании β-стабилизаторов до предела их растворимости в α-фазе (ОТ4, ОТ4-1, ОТ4-2, АТ3—АТ8).

Диаграммы II типа присущи α + β-сплавам с более высоким содержанием β-стабилизаторов (ВТ6С, ВТ6, ВТ14), что обусловливает возможность протекания вслед за β → α-превращением промежуточного β → ω-превращения при температурах соответственно ниже 600° С (ВТ6С) и 700° С (ВТ14). У более легированного сплава ВТ14 (А) это превращение происходит во всем исследованном интервале скоростей охлаждения (4—300° С/с), а у менее легированного (ВТ6С) — только при относительно невысоких скоростях (4,8—60° С/с). Изменение температуры начала этого превращения в сплаве ВТ14, характеризующееся максимумом, косвенно свидетельствует о влиянии скорости охлаждения на химическую неоднородность β-фазы по содержанию молибдена и ванадия. Основная структура этих сплавов представляет собой игольчатую α′-фазу (возможно и α″) на фоне остаточной β-фазы, количество которой с увеличением скорости охлаждения возрастает. У сплава ВТ14 количество β-фазы больше, чем у сплава ВТ6С.

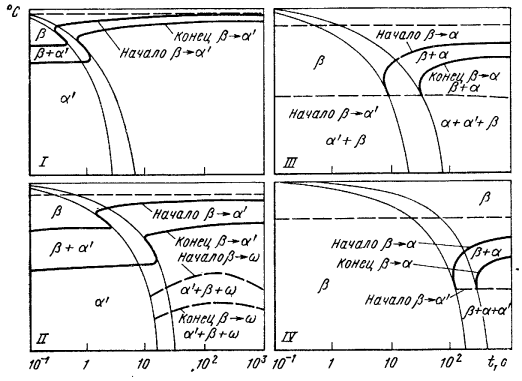


Рис. 15. Диаграммы анизотермического превращения сплавов титана в зоне полной перекристаллизации при сварке (схема):

I — технический титан ВТ1, α-сплавы (с 3,7% Al, ВТ5, ВТ5-1 и т. д.), низколегированные α + β-сплавы (АТ3—АТ8, ОТ4-0, ОТ4-1, ОТ4, ВТ4, ОТ4-2, ВТ18, ВТ20 и т. д.); *II* — среднелегированные α + β-сплавы (ВТ6С, ВТ6, ВТ14, ВТ8, ВТ9, ВТ3-1 и т. д.); *III* — высоколегированные α + β-сплавы (ВТ16, ВТ22 и т. д.); *IV* — метастабильные β-сплавы (ВТ15, ИВТ-1 и т. д.)

Изменение температуры β → α′-превращения в случае диаграмм I и II типов характеризуется S-образной кривой. В определенном интервале скоростей охлаждения наблюдается резкое ступенчатое снижение температуры начала и конца превращения. Это обусловлено неравномерным распределением кислорода и азота в β-фазе после завершения α → β-превращения при быстром нагреве и зависимостью процесса гомогенизации β-фазы от скорости последующего охлаждения. С увеличением скорости охлаждения v_0 выравнивание распределения этих газов в β-твердом растворе заметно затрудняется, и, начиная с некоторого критического значения v_0, интервал β → α′-превращения резко смещается в область более низких температур. При этом чем больше в сплавах элементов, способных затруднять диффузию кислорода и азота в β-фазе, тем меньше эти критические скорости охлаждения.

Чем выше содержание кислорода и азота, тем менее резкое влияние оказывает скорость охлаждения на снижение температуры β → α′-превращения. Это обусловлено существенным ускорением превращения в присутствии больших количеств кислорода и азота.

По мере увеличения содержания в (α + β)-сплавах легирующих элементов, образующих с титаном сплавы с диаграммами эвтектоидного типа (Mn, Fe, Cr, Si) или непрерывный ряд твердых растворов (Mo, V), интервал β → α′-превращения с ростом скорости охлаждения смещается в область более низких температур и расширяется.

Полиморфное превращение в сплавах I и II групп протекает по мартенситному механизму во всем исследованном интервале скоростей охлаждения (3—400° С/с), и α′-фаза имеет соответственно пластинчатое или игольчатое строение. Отличительной особенностью β → α′-превращения в титане и его сплавах по сравнению с мартенситным превращением в стали является его малый объемный эффект, который в зависимости от легирования колеблется в пределах 0,13—0,27%. Поэтому, в частности, α′-фаза значительно менее хрупка, чем мартенсит в стали. При охлаждении со скоростями выше критических α′-фаза приобретает характерную мелкоигольчатую структуру с более высокой плотностью дефектов кристаллической решетки. Такая структура отличается более высокими твердостью и прочностью и пониженной пластичностью.

В наиболее сильно легированных α + β-сплавах группы II (ВТ6, ВТ14) с частичным β → ω-превращением и небольшими количествами остаточной β-фазы пластичность снижается еще более резко.

Диаграмма превращения III типа свойственна еще более легированным α + β-сплавам типа ВТ16. Для них характерны две ступени превращения: при относительно низких скоростях охлаждения происходит β → α-превращение по диффузионному механизму; основная же часть β-твердого раствора превращается затем по мартенситной кинетике при температуре, обозначенной штриховой линией (см. рис. 15). Начиная с некоторых критических скоростей охлаждения, сохраняется только бездиффузионное β → α′-превращение.

Диаграммы IV типа характеризуют высоколегированные метастабильные β-сплавы типа ВТ15. Они также претерпевают сначала диффузионное, а затем мартенситное превращение, однако при очень малых скоростях охлаждения α-фаза выделяется по границам зерен β-фазы, а α′-фаза — во внутренних участках. При более высоких скоростях охлаждения сохраняется метастабильная β-фаза. Это обусловлено прежде всего внутрикристаллической неоднородностью металла шва, обогащением границ зерен в околошовной зоне хромом и молибденом и обеднением алюминием.

При содержании водорода более 0,003—0,007% в α- и α + β-сплавах I группы обнаруживается гидридное α′ — γ-превращение. Оно протекает в процессе охлаждения и при последующей выдержке при комнатной температуре со значительным увеличением объема.

При малых и средних скоростях гидриды выделяются в виде крупных пластинок, а при высоких скоростях — равномерно в виде дисперсных мелких включений. В случае грубых пластинчатых выделений гидридной фазы заметно снижается сопротивление основного металла и сварных соединений замедленному разрушению (образованию холодных трещин). Поэтому для предупреждения резких локальных искажений и концентрации микронапряжений, связанных с гидридным превращением, а также для ограничения роста зерна β- и α′-фаз, наиболее благоприятна сварка с высокими скоростями охлаждения.

Наиболее опасным дефектом околошовной зоны являются холодные трещины. Они образуются в стали с высоким содержанием мартенсита и сплавах титана с α′- и α′ + β-структурами. Чем выше содержание углерода в стали и кислорода и азота в сплавах титана, тем вероятнее их возникновение. Особенно опасным является растворенный водород. Как поверхностно-

активное вещество он облегчает возникновение и особенно распространение трещин.

Механизм образования холодных трещин как одного из видов хрупкого разрушения поликристаллических сплавов обусловлен развитием проскальзывания по границам зерен под влиянием остаточных или внешних напряжений, накоплением напряжений на поперечных действующим усилиям границах и образованием в них зародышевых трещин [6]. В чистом виде подобные механизмы характерны для разрушения мартенситной стали [6], а также высокопрочных и хрупких сплавов титана с повышенным содержанием газовых примесей. Однако в пластичных сплавах титана разрушение зарождается в соответствии с дислокационными моделями вследствие нелинейности скольжения в полосах скольжения в местах нагромождения дислокаций у препятствий или в результате искривления плоскостей скольжения при воздействии дислокаций в других действующих плоскостях скольжения. Сдвиг по изогнутым плоскостям вызывает появление нормальных напряжений, приводящих к отрыву скользящих плоскостей. Это характерно для металлов с гексагональной плотноупакованной решеткой с высокой анизотропией скольжения, у которых, как у α-титана, плоскости скольжения и спайности совпадают: плоскость базиса (1010).

Количественно оценивать сопротивляемость сварных соединений образованию холодных трещин принято по данным испытаний на замедленное разрушение под постоянной растягивающей или изгибающей нагрузкой (методы ИМЕТ-4, ЛТП и т. д.). Критериями оценки являются минимальное разрушающее напряжение, время до разрушения и предельная деформация. Полуколичественные оценки основаны на данных сварки жестких технологических проб, имитирующих отдельные узлы конструкций (например, крестовая проба, проба CTS с накладкой и регулируемой термической жесткостью). В этих пробах критериями служат допустимые твердость и количество хрупкой фазы в структуре, например количество мартенсита, и соответствующая им скорость охлаждения [6,5].

КРИТЕРИИ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИИ И РЕЖИМОВ СВАРКИ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Применяемые в сварочной технике разнообразные конструкционные материалы должны удовлетворять определенным требованиям не только эксплуатации (прочность при статической или динамической нагрузке, при нормальной, низкой или высокой температуре, под действием тех или иных активных сред), но и технологии сварки. Поэтому исследования свариваемости, представляющей комплексную технологическую характеристику поведения металлов при сварке, уже давно стали составной частью работ по созданию новых марок металла.

Прежде всего сварные соединения всех металлов должны обладать определенными показателями специальных свойств (например, жаропрочностью, высоким сопротивлением коррозии, термостойкостью и т. д.) при отсутствии нарушений сплошности (трещины, поры).

В качестве примера наиболее типичных условий, обеспечивающих свариваемость, можно привести следующие:

ограничение содержания газов и других вредных примесей в основном металле и металле шва или подавление их отрицательного действия путем дополнительного легирования металлов определенными элементами, путем рационального выбора газошлаковой защиты (при сварке плавлением), системы раскисления и т. д.;

стойкость против чрезмерного развития процессов рекристаллизации обработки и роста зерна при сварочном нагреве металла;

относительная легкость релаксации микро- и макроскопических напряжений при сварке и последующей обработке.

Очень часто требования эксплуатации и требования сварки оказываются противоречивыми. В наибольшей степени это проявляется при сварке сложнолегированных высокопрочных металлов и сплавов, в которых упрочнение достигается благодаря фазовому наклепу и дисперсионному упрочнению. Как правило, чем выше прочность свариваемых материалов, тем труднее обеспечить равнопрочность сварных соединений основному металлу и избежать образования горячих или холодных трещин.

В связи с этим при выборе критериев для расчетного определения режимов сварки тех или иных металлов необходим строго дифференцированный подход. Он зависит от физико-химических свойств свариваемых металлов и сплавов и от того, в каких зонах сварного соединения при данном виде или способе сварки возникают опасные дефекты или происходят неблагоприятные изменения структуры и свойств.

Однако, несмотря на разнообразие свойств и их изменений при сварке, в целях обеспечения ее оптимальной технологии все металлы и сплавы удобно разбить на три основные группы:

с большим объемным эффектом полиморфного превращения;

с малым объемным эффектом полиморфного превращения;

без полиморфных превращений.

При сварке металлов и сплавов первой группы вследствие высокого объемного эффекта полиморфного превращения ведущими в формировании структуры и свойств, как правило, являются мартенситное превращение и отпуск мартенсита, второй группы — кристаллизация, эвтектоидный распад и старение закаленных высокотемпературных фаз, а третьей группы — кристаллизация (особенно эвтектическая), рекристаллизация и старение. Общим для материалов второй и третьей групп является невозможность исправления грубой кристаллической структуры металла шва и рекристаллизованной структуры околошовной зоны последующей термической обработкой из-за малого объемного эффекта полиморфного превращения или отсутствия фазовой перекристаллизации.

Ниже рассматриваются принципы выбора критериев для расчетного определения режимов сварки плавлением разнообразных конструкционных материалов.

Критерии выбора технологии и режимов сварки металлов и сплавов с большим объемным эффектом полиморфного превращения. К материалам с большим объемным эффектом полиморфного превращения относят в первую очередь сталь перлитного и мартенситного классов, а также сплавы циркония, олова и т. д.

Выбор режимов и технологии сварки стали определяется типом конструкции, условиями ее эксплуатации и характером термической обработки до и после сварки. Последний фактор является решающим для получения необходимых структуры и механических свойств соединений. Все многообразие вариантов предъявляемых требований можно свести к следующим основным случаям [6].

1. *Сталь применяют после прокатки и не подвергают термической обработке после сварки.* В этом состоянии обычно используют малоуглеродистую сталь и низколегированную сталь некоторых простейших марок, не подверженные сколько-нибудь существенной закалке при сварке. Свойства сварных соединений такой стали в основном определяются степенью развития рекристаллизации и огрубления структуры околошовной зоны и шва. Режимы сварки выбирают по скорости охлаждения газов (v_0 внутри некоторого оптимального интервала $\Delta v_{опт}$, который обычно устанавливают по данным валиковой пробы [5] таким образом, чтобы ударная вязкость в зоне термического влияния при отрицательных температурах была не ниже 3 кгс·м/см^2. При этом в основном металле должно ограничиваться содержание газов ($<0{,}005\%$ O, $<0{,}005\%$ N и $0{,}0005\%$ H), в противном случае возможно старение и снижение сопротивления хрупкому разрушению. Для предупреждения образования горячих трещин в стали ограничивают содержание серы и некоторых других вредных примесей; соотношение между количеством марганца и серы определяется содержанием углерода:

C, %	0,06 — 0,11	0,11 — 0,125	0,15 — 0,16
Mn; S	$\geqslant 22$	$\geqslant 30$	$\geqslant 60$

Особенно стойка против рекристаллизационных процессов и межкристаллитных разрушений низколегированная сталь повышенной прочности с микролегирующими добавками ниобия, ванадия, алюминия, бора, меди и т. д. Благодаря природно мелкому зерну она сохраняет после сварки исходную прочность, высокую вязкость разрушения и постепенно заменяет термически упрочняемую сталь с $\sigma_в = 50 \div 70$ кгс/мм² [5].

2. *Сталь перед сваркой подвергают термической обработке на высокую прочность* (нормализация или закалка с высоким отпуском). После сварки предусматривается отпуск для снятия напряжений и выравнивания механических свойств в различных участках соединений. К сварным соединениям предъявляют требование равнопрочности с основным металлом в сочетании с определенными значениями ударной вязкости, пластичности и ряда специальных свойств, характеризующих работоспособность соединений в соответствующих условиях (например, критическая температура хрупкости и сопротивление хрупкому разрушению в условиях ударных или статических нагрузок при низких температурах; пределы длительной прочности и ползучести; сопротивление локальному разрушению при повышенных температурах и сложнонапряженном состоянии и т. д.).

В этом случае при технологических расчетах необходимо обеспечить выполнение двух противоречивых условий: во-первых, предупредить образование холодных трещин в околошовной зоне и шве в процессе сварки и при последующем хранении изделий до отпуска; во-вторых, добиться наименьшего возможного разупрочнения основного металла на участке высокого отпуска зоны термического влияния. Чтобы выполнить второе условие, сварку нужно вести по возможности при жестких режимах, т. е. пребывание этого участка основного металла выше температуры отпуска $T_{от}$ до сварки должно быть минимальным.

Это, однако, удается обеспечить практически только при относительно высоких скоростях нагрева и охлаждения. В качестве основного критерия при расчете параметров технологии и режимов наиболее производительных методов однопроходной и многослойной сварки длинными участками следует принимать предельно допустимую скорость охлаждения $v_д$, гарантирующую отсутствие трещин в околошовной зоне и шве.

Обычно величину $v_д$ устанавливают по данным для околошовной зоны, так как металл шва благодаря использованию менее легированного (особенно по углероду) присадочного металла обладает более высоким сопротивлением образованию холодных трещин.

Предельно допустимую скорость охлаждения околошовной зоны и соответствующую ей длительность $t' + t''$ пребывания металла выше температуры Ac_3 при нагреве t' и охлаждении t'' устанавливают по данным сварки жестких проб, лучше всего воспроизводящих тип соединений и уровень напряжений в данной сварной конструкции. Указанные величины выбирают для стали с повышенным содержанием углерода в зависимости от ее реакции на термический цикл:

по допустимому содержанию мартенсита в околошовной зоне [перлитная сталь со средней устойчивостью аустенита, у которой при сварке можно регулировать структурное состояние и свойства (рис. 16, сталь группы II)], обеспечивая достаточно полное развитие самоотпуска мартенсита в процессе охлаждения при однопроходной сварке или процессов отпуска при многослойной сварке. Последнее касается стали с высокой устойчивостью аустенита, практически не изменяющей своего структурного состояния и свойств в околошовной зоне при простом термическом цикле (рис. 16, сталь группы I преимущественно с бейнитной структурой и группы III с мартенситной структурой). При сварке стали с пониженным содержанием углерода скорость $v_д$ целесообразно выбирать весьма высокой, так как образование трещин удается предупреждать, резко ограничивая рост зерен. При этом не происходит и разупрочнения основного металла в зоне отпуска.

При сварке стали со средней устойчивостью аустенита выбранный по $v_д$ режим часто требует корректировки для получения заданных механических свойств. В этом случае дополнительным критерием служит интервал скоростей охлаждения $\Delta v_{опт}$, в котором обеспечиваются оптимальные механические свойства в околошовной зоне и в других участках соединения до и особенно после отпуска. Интервал $\Delta v_{опт}$ устанавливают по методам ИМЕТ-1, по валиковой пробе или непосредственно на сварных соединениях [5].

Если предельно допустимую скорость охлаждения не удается обеспечить без подогрева или без перехода на сварку участками, то для уточнения параметров режимов и технологии сварки необходимы специальные исследования влияния продолжительности $t_{от}$ на разупрочнение основного металла в процессе сварки.

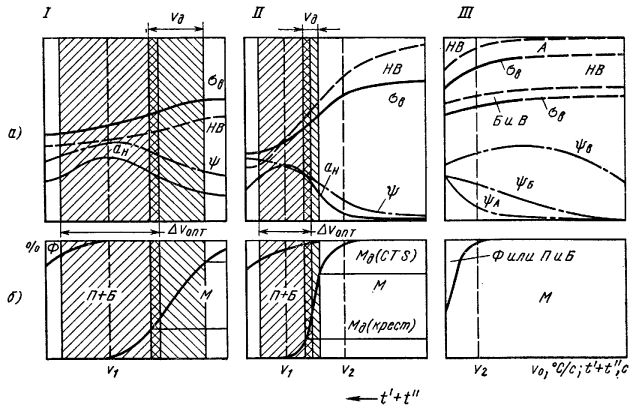


Рис. 16. Механические свойства (*а*) и структура (*б*) стали в околошовной зоне в зависимости от длительности $t' + t''$ пребывания выше Ac_3 и последующей скорости охлаждения v_0 (схема):

I — низкоуглеродистая среднелегированная хромистая сталь (0,1—0,15% С и 2—4% Cr) с повышенной устойчивостью аустенита, при сварке которой преобладает перлитное и особенно бейнитное превращение; *II* — низколегированная сталь с малым (до 0,2%) и средним (0,45%) содержанием углерода, обладающая соответственно малой и средней устойчивостью аустенита; *III* — низко- и среднелегированная хромистая сталь с повышенным содержанием углерода, обладающая высокой устойчивостью аустенита при сварке *(А)*, и высоколегированная хромистая сталь (11—13% Cr) мартенситного класса без никеля с 0,1—0,25% С *(Б)* и с никелем и 0,1—0,15% С *(В)*

например, с помощью метода ИМЕТ-1 или непосредственно на сварных соединениях [6].

К сталям, сварные соединения которой должны быть после отпуска равнопрочны основному металлу, относятся:

теплоустойчивая низколегированная (12МХ, 35ХМ, 35ХМФ, 35ХВФ) и среднелегированная типа 20Х2, 5МВФ, 20Х2МФ;

жаропрочная с 11—13% С;

высокопрочная низколегированная (30ХГСА, 25ХГФА) и среднелегированная типа 22Х2, 5НВФ и 17Х3НВФ и т. д.

3. *Сталь перед сваркой подвергают термической обработке* (нормализация, закалка с отпуском). После сварки отпуск исключен из-за больших габаритных размеров конструкции. По характеру эксплуатационной нагрузки (например, многократный удар при нормальных или отрицательных температурах) решающим является требование высокого сопротивления сварных конструкций хрупкому

разрушению. В ряде случаев жестких требований к равнопрочности сварных соединений основному металлу в условиях статического нагружения не предъявляется. Однако для определенных конструкций требование равнопрочности обязательно.

В обоих случаях структуру и механические свойства сварных соединений регулируют полностью при сварке. Рассчитывая технологию и режимы сварки, следует исходить не только из того, чтобы предупредить образование холодных трещин без отпуска, но и из необходимости обеспечить оптимальное соотношение механических свойств металла в околошовной зоне (для предупреждения охрупчивания вследствие закалки, роста зерна и перегрева), в зоне отпуска (для предупреждения отпускной хрупкости) и шве непосредственно после сварки.

Для выполнения этих условий в качестве основного критерия расчета параметров технологии и режимов однопроходной и многослойной сварки длинными участками принимают скорость охлаждения v_0 околошовной зоны. Эту скорость выбирают в зависимости от толщины металла и конструкции соединения внутри интервала скоростей $\Delta v_{опт}$ (и соответствующих им длительностей $t' + t''$), в котором достигается оптимальное сочетание механических свойств в зоне термического влияния и шве. Чтобы предупредить опасность образования холодных трещин, скорость охлаждения v_0 следует назначать с учетом допустимой скорости $v_д$, которая в зависимости от типа стали и жесткости сварного соединения может в большей или меньшей мере ограничивать диапазон приемлемых скоростей охлаждения внутри интервала $\Delta v_{опт}$ (группы стали I и II на рис. 16). Значения $\Delta v_{опт}$ и $v_д$ устанавливают методами, указанными в п. 2.

К стали, к которой предъявляют эти требования, относятся низколегированная сталь типа 12ХН2, 25Н3, 36СГНА, 18Х2ВФ, 20НГМ, 23Г, 17ГС, 20ХГС, 35ХГСА, 40Х, а также сталь 45.

4. *Сталь перед сваркой подвергают отжигу, а после сварки — полной термической обработке* (закалка и низкий отпуск) *на сверхвысокую прочность* 150—200 кгс/мм². Требования к сварным соединениям те же, что и к соединениям 2-й группы. К этой группе относят сталь с высокой устойчивостью аустенита — низколегированную с повышенным содержанием углерода (35ХГСА, 40ХГСА, 40ХГСНМТА, 45ХМА, 45ХНМТА), с 2—3% Cr (30Х2ГСНВМ, 42Х2ГСНМ, 43Х3СНМФА) и 12% Cr (15Х12НМВФА). Ее применяют для изделий малой толщины, которые сваривают преимущественно в один-три прохода. Параметры сварки выбирают по скорости охлаждения околошовной зоны $v_д$, гарантирующей отсутствие холодных трещин при сварке и в течение вылеживания изделий до отпуска или полной термической обработки.

Значения критериев $v_д$ и $\Delta v_{опт}$ для стали различных марок приведены в табл. 1 и 2.

Критерии выбора технологии и режимов сварки металлов и сплавов с малым объемным эффектом полиморфного превращения. В этом разделе рассмотрены принципы выбора технологии и режимов сварки α- и α + β-сплавов титана. Сплавы титана, как и сталь, претерпевают в процессе сбработки по термическому циклу сварки полиморфные превращения, однако если в железе $\gamma \rightarrow \alpha$-превращение сопровождается увеличением удельного объема на 3%, то в титане $\beta \rightarrow \alpha$-превращение имеет практически неощутимый объемный эффект противоположного знака (удельный объем уменьшается на 0,13%) [6].

Титан и его сплавы широко используют для ответственных сварных конструкций, работающих при повышенных и при отрицательных температурах в условиях сложнонапряженного состояния.

С точки зрения требований к механическим свойствам сварных соединений целесообразно подразделить сплавы на две основные группы.

1. *Сплавы, применяемые в состоянии после прокатки или отжига.* Упрочняющую термическую обработку после сварки не проводят. Для изделий с жесткими соединениями назначают отжиг с целью снятия напряжений. К сплавам этой группы относят технический титан и его α- и α + β-сплавы мартенситного класса, упрочнение которых достигается целиком благодаря легированию α-твердого ра-

1. Оптимальный интервал скоростей охлаждения при сварке по данным изменения структуры и свойств сталей в околошовной зоне

Сталь	Оптимальный интервал скорости охлаждения			Количество мартенсита, %, соответствующее пределам $\Delta v_{опт}$	*HB*, соответствующая пределам $\Delta v_{опт}$
	$\Delta v_{опт}$, °С/с	По каким свойствам выбран (при +20° С)*1	По какой пробе выбран		
Сталь углеродистая обыкновенного качества					
Ст2	0—18	$a_н \geqslant 5$ (при −60° С)	Валиковая ($S = 20$ мм)	—	155—170
Ст3кп	1,2—12	$a_н \geqslant 2$ (при −50° С)	Валиковая ($S = 12$ мм)		—
МСт5Гпс	0,1—20	$\psi \geqslant 35$; $\delta \geqslant 12$	ИМЕТ-1	—	125—260
МСт5сп	0,1—30	$\psi \geqslant 30$; $\delta \geqslant 12$		0—15	130—200
МСт5	0,12—40	$a_н \geqslant 2$		—	130—190
БСт3	1,4—15	$a_н \geqslant 5$ (при −50° С)	Валиковая ($S = 12$ мм)	—	155—165
Сталь углеродистая качественная конструкционная					
35	0,12—7,0	$a_н \geqslant 2$	ИМЕТ-1	0—30	130—200
40	2,4—5,0	$a_н \geqslant 6$	Валиковая	—	265—280
45	2,0—4,0	$a_н \geqslant 3{,}5$ или $a_{0{,}025} \geqslant 2$	($S = 16$ мм)	< 5	230—250
Сталь низколегированная конструкционная					
Марганцовистая					
09Г2	1,0—15	$a_н \geqslant 3$ (при −60° С)	Валиковая ($S = 12$ мм)	—	215—185
10Г2У	0,7—3,8	$a_н \geqslant 4$ при −60° С)	Валиковая ($S = 10$ мм)		205—180
10Г2Б	0,1—70	$\psi \geqslant 40$; $\delta \geqslant 15$	ИМЕТ-1	0—10	210—165
14Г2	1,0—1,2	$a_н \geqslant 2$ (при −70° С)	Валиковая ($S = 20$ мм)	—	225—270
18Г2АФпс	0,1—12	$\psi \geqslant 35$; $\delta \geqslant 17$	ИМЕТ-1	0—30	190—275
Кремнемарганцевая					
16ГС	1,0—12,0	$a_н \geqslant 2$ (при −60° С)	Валиковая ($S = 20$ мм)		190—225
16ГС	1,0—6,0	$a_н \geqslant 6$			235—260
16ГС	1,0—8,5	$a_н \geqslant 2$ (при −60° С)	Валиковая ($S = 12$ мм)	—	170—210
17ГС	10—30	$a_н \geqslant 4$ (при −60° С)	Валиковая ($S = 11$ мм)		225—235
10Г2СД	1,0—15	$a_н \geqslant 2$ (при −60° С)	Валиковая ($S = 12$ мм)		185—250
Марганцовистая с титаном					
10ГТ	0,1—40	$a_н \geqslant 10$ (при −40° С)	ИМЕТ-1	—	140—215

Продолжение табл. 1

Сталь	Оптимальный интервал скорости охлаждения: $\Delta v_{опт}$, °С/с	По каким свойствам выбран (при +20° С)*1	По какой пробе выбран	Количество мартенсита, %, соответствующее пределам $\Delta v_{опт}$	*HB*, соответствующая пределам $\Delta v_{опт}$
Хромокремнемарганцовая					
14ХГС	0,8—2,6	$a_н \geqslant 5$ (при −60° С)	Валиковая ($S = 10$ мм)		170—215
14ХГС	2,4—16	$a_н \geqslant 4$ (при −70° С)	Валиковая ($S = 20$ мм)	—	200—225
03ХГСНД	6,0—50	$\delta \geqslant 18$; $\psi \geqslant 35$	ИМЕТ-1	0—20	205—230
12ХГСМФ	0,1—30	$\delta \geqslant 25$; $\psi \geqslant 50$			205—300
Хромомарганцовоникелевая					
12ХГН	1,2—52	$a_н \geqslant 3$ (при −60° С)	Валиковая ($S = 16$ мм)		170—240
12ХГН	1,3—16	$a_н \geqslant 4$ (при −60° С)	Валиковая ($S = 20$ мм)	—	210—250
15ХГН	1,3—6,0	$a_н \geqslant 3$ (при −70° С)			250—265
12ХГНМ	2,0—50	$\delta \geqslant 25$; $\psi \geqslant 50$	ИМЕТ-1	0—80	190—230
15ХГНМ	1,0—10	$\delta \geqslant 15$; $\psi \geqslant 35$		0—20	250—320
Хромомарганцовая					
14ХГ2	1,2—5,5	$a_н \geqslant 2$ (при −50° С)	Валиковая ($S = 20$ мм)	—	325—335
10ХГ2Н	1,5—15	$a_н \geqslant 10$			235—265
10ХГ2СН	1,3—4,8	$a_н \geqslant 8$			260—265
17ХГ2САФР	0,1—20	$\psi \geqslant 35$; $\delta \geqslant 16$	ИМЕТ-1	0—5	180—305
Хромокремненикелевая с медью					
10ХСНД	0,8—15	$a_н \geqslant 12$	Валиковая ($S = 18$ мм)	—	250—275
15ХСНД	1,8—9,0	$a_н \geqslant 7$ и $\varphi \geqslant 100°$	Валиковая ($S = 12$ мм)		230—250
Сталь легированная конструкционная					
Хромистая					
40Х	4,0—14	$a_н \geqslant 5$ или $a_{0,025} \geqslant 3,5$	Валиковая ($S = 16$ мм)	75—90	340—460
Марганцовистая					
23Г	2,5—70	$a_н \geqslant 5$ или $a_{0,025} \geqslant 3$	Валиковая ($S = 16$ мм)	5—100	220—440
25Г2Л	$\leqslant 8,0$	$\psi \geqslant 20$	ИМЕТ-1	0—10	220
30Г2Л	$\leqslant 6,0$			0—20	300
Хромомарганцовая					
25ХГНА	$\leqslant 20$	$\psi \geqslant 25$	ИМЕТ-1	—	365

Продолжение табл. 1

Сталь	Оптимальный интервал скорости охлаждения: $\Delta v_{опт}$, °С/с	По каким свойствам выбран (при +20 °С)*1	По какой пробе выбран	Количество мартенсита, %, соответствующее пределам $\Delta v_{опт}$	*HB*, соответствующая пределам $\Delta v_{опт}$
Кремнемарганцевая с никелем					
36СГНА	2—18	$a_н \geqslant 3,5$ или $a_{0,025} \geqslant 2$	Валиковая ($S = 16$ мм)	25—80	330—470
Хромомолибденовая					
12МХ	2—100	$\psi \geqslant 40$	ИМЕТ-1	0—50	155—275
30ХМА	0,1—10	$\psi \geqslant 30$; $\delta \geqslant 12$		0—15	190—250
35ХМ	1—5	$\psi \geqslant 25$		0—40	230—340
40ХМА	$\leqslant 0,7$	$\psi \geqslant 20$		$\leqslant 50$	390
35ХМФА	Нет	—	—	—	—
Никельмолибденовая с марганцем					
20НГМ	0,8—70	$a_н \geqslant 5$ или $a_{0,025} \geqslant 3,5$	Валиковая ($S = 16$ мм)	0—100	260—415
Никелевая					
25Н3	0,8—70	$a_н \geqslant 5$ или $a_{0,025} \geqslant 3,5$	Валиковая ($S = 16$ мм)	0—100	175—455
Хромоникелевая					
12ХН2	0,8—50	$a_н \geqslant 5$ или $a_{0,025} \geqslant 3,5$	Валиковая ($S = 16$ мм)	0—100	215—420
Хромокремнемарганцовая					
20ХГСА	1,6—70	$\psi \geqslant 25$	ИМЕТ-1		250—420
20ХГС	7,0—70	$a_н \geqslant 5$ или $a_{0,025} \geqslant 3,5$	Валиковая ($S = 16$ мм)	0—100	350—470
20ХГС	1,9—12	$a_н \geqslant 5$ и $\varphi \geqslant 75°$	Валиковая ($S = 14$ мм)		315—385
25ХГСА	0,07—1,3	$\psi \geqslant 20$	ИМЕТ-1	—	170—250
25ХГСНМА	$\leqslant 50$	$\psi \geqslant 25$			$\leqslant 465$
30ХГСА	1,6—6,0	$\psi \geqslant 22$		0—80	345—450
35ХГСА	1,5—7,0	$a_н \geqslant 5$ или $a_{0,025} \geqslant 3,5$	Валиковая ($S = 16$ мм)	30—90	400—450
40ХГСА	$\leqslant 0,5$	$\psi \geqslant 20$	ИМЕТ-1	0—50	$\leqslant 380$
40ХГСНМТА	$\leqslant 0,6$				$\leqslant 440$
30Х2ГСНВМ	Нет	—			
42Х2ГСНМ					
Хромомарганцовоникелевая					
08Х3, 5ГНВФ	Не ограничивается	$\psi \geqslant 30$	ИМЕТ-1	0—100	227—370
10Х3ГНВФБ	1—25	$\psi \geqslant 25$		0—50	313—342
13Х3ГНВФБ					$\leqslant 340$

Продолжение табл. 1

Сталь	Оптимальный интервал скорости охлаждения: $\Delta v_{опт}$, °С/с	По каким свойствам выбран (при +20 °С)*1	По какой пробе выбран	Количество мартенсита, %, соответствующее пределам $\Delta v_{опт}$	HB, соответствующая пределам $\Delta v_{опт}$
Хромомарганцовованадиевая					
12Х3, 5ГВФБ 13Х3, 5ГВФБ	Не ограничивается	$\psi \geqslant 30$	ИМЕТ-1	0—100	263—310 313—350
12Х4, 5ГВФ	1,5—9,0			–	350—365
15Х3, 5ГВФ	1,5—25	$\psi \geqslant 25$		0—15	330—355
Хромокремненикелевая					
25ХСНВФА	$\leqslant 25$	$\psi \geqslant 25$	ИМЕТ-1	–	$\leqslant 425$
30ХСНВФА	$\leqslant 10$	$\psi \geqslant 17$			$\leqslant 450$
28Х3СНВФМА		$\psi \geqslant 20$		100	$\leqslant 530$
33Х3СНВФМА	$\leqslant 0,6$				$\leqslant 580$
43Х3СНВФМА	Нет	–	–	–	–
45ХНМТА	$< 0,5$	$\psi \geqslant 20$		0—50	$\leqslant 430$
12Х2Н4МД	Не ограничивается		ИМЕТ-1		245—360
16Х2Н4МД 19Х2Н4МД	$\leqslant 14$ $\leqslant 12$	$\psi \geqslant 35$		–	325—365 285—370
Хромовольфрамованадиевая					
10Х2, 5ВФА 12Х3ВФА	Не ограничивается	$\psi \geqslant 25$	ИМЕТ-1	0 0—10	225—325 305—375
13Х2, 5ВФА	3—35	$\psi \geqslant 26$		0	295—335
17Х2, 5ВФБ	1—25	$\psi \geqslant 25$		0—10	315—375
18Х2ВФ	2—11	$a_н \geqslant 10$ или $a_{0,025} \geqslant 5$	Валиковая ($S = 16$ мм)	–	310—315
20Х2, 5ВФ	1—10	$\psi \geqslant 25$		0—10	320—375
35ХВФА	0,5—5	$\psi \geqslant 20$	ИМЕТ-1	0—50	300—420
Хромоникельвольфрамованадиевая					
11Х3НВФ	5—35	$\psi \geqslant 25$	ИМЕТ-1	0	285—305
13Х2, 55НВФ	1—35				295—345
17Х3, 5НВФ	5—25			0—25	350—395
22Х2, 5НВФ	1—6				
10Х3, 5НВФБ	1—35			0	325—340
10Х4НВФБ 12Х3НВФБ	Не ограничивается			0—30 0—5	295—325 320—365 315—355
15Х2, 5НВФ6	5—25			0—10	340—375

Продолжение табл. 1

Сталь	Оптимальный интервал скорости охлаждения: $\Delta v_{опт}$, °С/с	По каким свойствам выбран (при +20 °С)*1	По какой пробе выбран	Количество мартенсита, %, соответствующее пределам $\Delta v_{опт}$	HB, соответствующая пределам $\Delta v_{опт}$
Хромоникельмолибденованадиевая и хромомолибденованадиевая					
11Х2НМВФ	1—35	$\psi \geqslant 25$	ИМЕТ-1	0—20	335—365
20Х2МФ	1—25	$\psi \geqslant 40$		0—30	270—425
20Х2, 5МВФ		$\psi \geqslant 35$		0—10	315—410
Сталь и сплавы высоколегированные коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные (деформируемые)					
Стали мартенситного класса					
Х5М	0,8—8,0	$\psi \geqslant 25$	ИМЕТ-1	–	340—370
Х5ВА	0,8—15				340—350
Х5ВА	0,7—30				330—340
Х5ВФА	0,9—30				330—350
20Х13	Нет	–	–	–	–
Стали мартенситно-ферритного класса					
15Х11МФ	$\leqslant 40$	$\psi = 20$	ИМЕТ-1	0—100	$\leqslant 395$
15Х11МФБ		$\psi = 17$—20			$\leqslant 320$
25Х11М3Ф	Нет	–	–	–	–
15Х12ВНМФА	Не ограничивается	$\psi \geqslant 40$	ИМЕТ-1	0—100	420—475
15Х12Н2МФ		$\psi \geqslant 45$		0—95	420—440
15Х12ВМФ	$\leqslant 25$	$\psi \geqslant 12$		0—100	$\leqslant 395$
15Х12ВМФ с Ti, N_2 и B	Нет	–	–	–	–
15Х11ВФ	$\leqslant 40$	$\psi \geqslant 18$—20	ИМЕТ-1	0—100	$\leqslant 395$
12Х13	Не ограничивается	$\psi \geqslant 17$		0—100	$\leqslant 380$
Стали ферритного класса					
08Х13	Не ограничивается	$\psi \geqslant 18$—20	ИМЕТ-1	0	125—220

*1 При 20 °С; $a_н$, кгс·м/см²; δ и ψ, %

2. Допустимые скорости охлаждения при сварке по данным испытаний на сопротивляемость стали образованию холодных трещин

Тип стали	Проба CTS: Скорость охлаждения, $v_д$, °С/с	Проба CTS: Количество мартенсита, %	Проба CTS: HB	Крестовая проба: Скорость охлаждения, $v_д$, °С/с	Крестовая проба: Количество мартенсита, %	Крестовая проба: HB	ИМЕТ-4: Минимальное разрушающее напряжение $\sigma_р$, min, кгс/мм²	ИМЕТ-4: Время до разрушения при $\sigma_р$, min, ч
45	15	80	400	8	30	375	58,0	1,7
40Х	5,5		470	2,5*1	55	390	46,0	6,6
23Г	17	90	422	6	45	320	–	
36СГНА			495	7	70	460		
35ХМ	15	70	430	–	–	–		
45ХМА	–			5*1	90	467	21,0	3,4
35ХМФА				7,0	60	420	–	
25Н3	36	90	455	24	85	435		
12ХН2			410		75	390		
20ХГСА	–			6	30	310	⩽ 180	–
20ХГС	12	65	410		35	360	–	
30ХГСА	–			2*1	20	390	127,0	14,2
35ХГСА	5,5	90	440	2*1	70	390	84,0	12,5
40ХГСА	–			5*1	90	494	76,0	2,8
40ХГСНМТА						490	103,0	1,8
45ХНМТА						480	28,0	2,3
17Х2, 5ВФБ	40	10	400	–				
20Х2, 5ВФ	17							
35ХВФА	–			4,5	45	395	80,0	2,7
17Х3, 5НВФ (типа ЭИ 712)	40	25	400	–	–	–	–	–
22Х2, 5НВФ (типа ЭИ 659)	10	10					⩽ 173	
20Х2МФ	15	20	420				–	
16Х2, 5МВФ (типа ЭИ 415)	25	10	410					
15Х11МФ	25*1		390					
15Х11МФБ	40*1		320					
15Х12ВМФ	25*1	100	380				⩽ 133	
15Х11ВФ	25*1		390				–	
12Х13	15		380				⩽ 124	

*1 Отмечены $v_д$ при условии сопутствующего подогрева не ниже 250 °С для стали марок 40ХГСА, 45ХМА, 40ХГСНМТА и 45ХНМТА, предварительного подогрева не ниже 200 °С для стали типа Х12 и не ниже 100 °С для стали марок 40Х, 30ХГСА и 35ХГСА; сталь тех марок, для которых $v_д$ не указана, практически несклонна к образованию трещин в пределах $\Delta v_{опт}$; для стали марок 30Х2ГСНВМ, 42Х2ГСНМ и 43Х3СНВФМА $\Delta v_{опт}$ и $v_д$ не указаны, так как ее сваривают в отожженном состоянии с последующей полной термообработкой; при сварке на морозе до —45° С хладостойкой стали марок 12ХН2, 20НГМ и 25Н3 $v_д$ должна быть снижена до 6—7 °С/с.

створа. Содержание β-стабилизаторов в этих α + β-сплавах ниже или несколько выше предела их растворимости в α-фазе (рис. 17, группа *III*).

Структура и свойства сварных соединений этих сплавов целиком определяются технологией и режимом процесса сварки. Поэтому основным критерием выбора этих величин служит интервал скоростей охлаждения $\Delta v_{опт}$, в котором степень снижения уровня пластических свойств и ударной вязкости околошовной зоны и шва по сравнению с основным металлом наименьшая. Если сплавы применяют в деформированном состоянии и после сварки отжигу не подвергают, то в связи с опасностью резкого разупрочнения дополнительным критерием служит длительность $t_р$ пребывания основного металла шва выше температуры рекристаллиза-

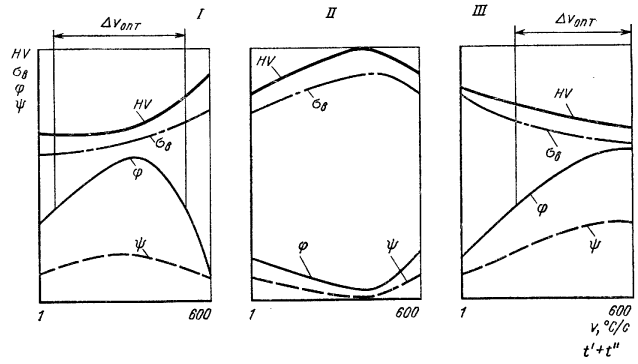


Рис. 17. Изменение механических свойств сплавов титана в околошовной зоне в зависимости от скорости охлаждения при сварке:

I — сплавы со структурой чистой α-фазы или с малым количеством ω- и β-фаз (технический титан ВТ1, α-сплавы с 3,7% Al, ВТ5, ВТ5-1 и др.), низколегированные α + β-сплавы (АТ3—АТ8, ОТ4-0, ОТ4-1, ОТ4, ВТ4, ОТ4-2, ВТ18, ВТ20 и т. д.); *II* — сплавы с фазовой структурой α′ + β + ω при малом и среднем количестве β-фазы (среднелегированные α + β-сплавы ВТ6, ВТ14, ВТ8, ВТ9, ВТ3-1 и т. д.); *III* — сплавы со структурой β + α′ + α при повышенном и высоком содержании β-фазы (высоколегированные α + β-сплавы ВТ16, ВТ22, метастабильные β-сплавы ВТ15, ИВТ-1 и т. д.)

ции обработки в участке зоны термического влияния, нагреваемом до температуры начала α → β-превращения. При содержании алюминия до 4—4,5% и β-стабилизаторов не более предела растворимости в α-фазе эти сплавы имеют достаточно широкий интервал $\Delta v_{опт}$. Наиболее высокими характеристиками пластичности сварные соединения этих сплавов обладают при средних и относительно высоких скоростях охлаждения соответствующих режимам аргонодуговой сварки металла средней или малой толщины. При мягких режимах пластичность снижается из-за роста зерна и перегрева металла в околошовной зоне, а при очень жестких — вследствие образования более резких закалочных α′-структур.

Уровень пластических свойств сварных соединений этих сплавов и ширина интервала $\Delta v_{опт}$ существенно зависят от содержания газов, алюминия, типа и количества β-стабилизаторов. Особенно резко пластичность падает при высоком содержании алюминия (ОТ4-2, АТ6, АТ8).

Для повышения сопротивления сплавов титана замедленному разрушению (образованию холодных трещин) рекомендуется ограничивать содержание газов в основном металле (О и N ⩽ 0,1 ÷ 0,15% и Н ⩽ 0,005 ÷ 0,008%) и вводить

в него и в металл шва 1—3% Zr, подавляющего отрицательное влияние кислорода [6].

2. *Сплавы, применяемые в состоянии после упрочняющей термической обработки (закалка и старение).* Перед сваркой основной металл подвергают закалке или отжигу, а после сварки закалке и старению. К этой группе относят сплавы с $\alpha + \beta$-структурой.

Основным критерием выбора режимов и технологии сварки $\alpha + \beta$-сплавов также служит интервал $\Delta v_{опт}$. Однако его назначают не только ради получения максимальных пластических свойств соединений после сварки, а также чтобы обеспечить благоприятные условия правки до полной термообработки. В противном случае из-за низкой пластичности шва и околошовной зоны после сварки изделия перед правкой приходится подвергать отжигу или закалке в зависимости от состава сплавов. Выбор интервала $\Delta v_{опт}$ должен быть обоснован также и с точки зрения требуемой прочности, пластичности и ряда специальных свойств соединений после окончательной термической обработки. При высоком содержании β-стабилизаторов в сплаве интервал $\Delta v_{опт}$ следует выбирать так, чтобы химическая и физическая неоднородность сварных швов и околошовной зоны была минимальна. Здесь имеются в виду внутрикристаллическая неоднородность в металле шва при кристаллизации, рост зерна в шве и околошовной зоне, обогащение пограничных областей зерен, субзерен и фрагментов легирующими элементами и другие процессы, приводящие к резкому снижению дисперсности продуктов старения, т. е. выделений α-фазы и интерметаллических соединений. Кроме того, для получения по возможности равномерных механических свойств во всех участках сварного соединения необходимо ограничивать подстаривание основного металла в процессе сварки в участке зоны термического влияния, который нагревается до температур интенсивного старения. Обычно эти требования выполняются в условиях сварки при очень жестких режимах.

На рис. 17 сплавы с $\alpha + \beta$-структурой разделены на две группы в зависимости от количества β-фазы. Сварные соединения сплавов группы с малым и средним количеством остаточной β-фазы [ВТ6, ВТ14 (Б), ВТ14 (А), ВТ14] характеризуются резким снижением пластических свойств в широком интервале средних скоростей охлаждения вследствие неблагоприятного соотношения α'-, ω- и β-фаз (рис. 17, группа *II*). Ширина этого интервала зависит от количества β-стабилизаторов. Вне этого интервала пластичность несколько повышается: при малых скоростях охлаждения — вследствие снижения количества β-фазы, а при высоких скоростях, наоборот, за счет ее увеличения. Для правки изделий из этих сплавов после сварки необходим отжиг на α-фазу. После закалки и старения пластичность соединений практически не возрастает.

К сплавам второй группы (рис. 17, группа *III*), отнесены высоколегированные $\alpha + \beta$-сплавы с высоким содержанием β-фазы (ВТ16) или со структурой метастабильной β-фазы (ВТ15). Высокое содержание β-фазы в околошовной зоне и шве обеспечивает высокую пластичность сварных соединений этих сплавов непосредственно после сварки в условиях средних и жестких режимов. Благодаря этому они легко подвергаются правке. У более легированного сплава ВТ15 $\Delta v_{опт}$ значительно более широкий, чем у сплава ВТ16. Вне интервала $\Delta v_{опт}$ (при малых скоростях охлаждения) пластичность падает из-за появления α- и α'-фаз. Резкое снижение пластичности сварных соединений этих сплавов (особенно ВТ15) после старения связано с химической неоднородностью структуры.

Рекомендуемые значения $\Delta v_{опт}$ для различных сплавов титана приведены в табл. 3, а сравнительные данные о сопротивляемости их образованию холодных трещин — в табл. 4.

Критерии выбора технологии и режимов сварки металлов и сплавов, не имеющих полиморфных превращений. К группе материалов без полиморфизма следует отнести аустенитные сплавы на железохромоникелевой или никельхромистой основах, сохраняющие при комнатной температуре структуру γ-твердого раствора, сплавы тугоплавких металлов, алюминиевые сплавы, β-сплавы титана и т. д.

3. Оптимальный интервал скоростей охлаждения при сварке по данным изменения структуры и свойств сплавов титана в околошовной зоне (метод ИМЕТ-1)

Тип сплава (состав, %)	Оптимальный интервал скоростей охлаждения	
	$\Delta v_{опт}$, °С/с	По каким свойствам выбран (ψ и δ%, φ°)
Технический титан	10—100	Пластические свойства низкие; $\psi = 7$; $\varphi = 30 \div 48$
То же	4—150	$\psi > 20$; $\varphi > 80$
ВТ1	3—400	$\psi > 30$
ВТ1-0	1—500	$\psi > 25$
Ti — 3,7Al	4—500	$\psi > 25$; $\varphi > 60$
ВТ5	5—50	$\psi > 20$; $\varphi > 80$
ВТ5-1	1—600	$\psi > 20$; $\varphi > 60$
ВТ5 (поковка)	1—200	$\psi > 20$; $\varphi > 60$
Ti — 3Al	1—70	Пластические свойства низкие; $\psi = 18 \div 20$; $\varphi = 30 \div 50$
Ti — 3Mn	7—25	Пластические свойства низкие; $\psi = 15 \div 18$
Ti — 3W	7—50	$\psi > 20$
Ti — 2,2Al — 2,5Zr (0,13—0,15O_2)	15—150	$\delta > 17$; $\psi > 28$; $\varphi > 70$
Ti — 2,2Al — 2,5Zr (0,18—0,2O_2)	10—200	$\delta > 15$; $\psi > 23$; $\varphi > 110$
Ti — 2,2Al — 2,5Zr (0,38—0,4O_2)	10—150	$\delta > 12$; $\psi > 18$; $\varphi > 48$
Ti — 4Al — 1V — 4Sn — 8Zr	1—10	$\delta > 17$; $\psi > 18$; $\varphi > 37$
Ti — 4,3Al — 0,7 Fe	20—200	$\delta > 16$; $\psi > 20$; $\varphi > 47$
Ti — 5Al — 1,9V — 0,55Fe	10—150	$\delta > 14$; $\psi > 15$; $\varphi > 43$
Ti — 4,4Al — 0,9Mo — 1Cr	20—100	$\delta > 8$; $\psi > 18$; $\varphi > 40$
Ti — 4,5Al — 0,7Cr — 0,6Mo	1—50	$\delta > 10$; $\psi > 25$; $\varphi > 25$
Ti — 3Al — 6Sn — 2Mn — 3Zr	8—20	$\delta > 15$; $\psi > 16$; $\varphi > 26$
ОТ4 (В)	7—70	$\psi > 23$; $\varphi > 80$
ОТ4 (В)	1—200	$\psi > 20$; $\varphi > 60$
ОТ4 (А)	2,5—400	$\psi > 30$; $\varphi > 80$
ОТ4 (Б)	9—60	$\psi > 23$; $\varphi > 70$
ОТ4 (Б)	3—200	$\psi > 20$; $\varphi > 60$
ОТ4-1	18—100	$\psi > 23$; $\varphi > 70$
ОТ4-1	12—150	$\psi > 20$; $\varphi > 60$
ОТ4-2	15—60	Пластические свойства низкие; $\psi = 18 \div 19$; $\varphi = 30$
АТ3Н	25—60	$\psi > 23$
АТ3Н	10—300	$\psi > 20$
АТ3С	8—150	$\psi > 27$; $\varphi > 120$
АТ3С	1,5—350	$\psi > 25$; $\varphi > 80$
АТ3В	2—100	$\psi > 23$; $\varphi > 60$
АТ4Н	2—300	$\psi > 23$; $\varphi > 80$
АТ4С	5—120	$\psi > 23$; $\varphi > 80$
АТ4В	20—75	$\psi > 22$; $\varphi > 55$
АТ8Н	1—600	Пластические свойства низкие; $\psi = 15 \div 17$; $\varphi = 50 \div 55$
ИРМ-2	20—120	$\psi > 30$; $\varphi > 80$
ИРМ-2	12—350	$\psi > 28$; $\varphi > 60$
Ti — 5,8Al — 2,4V	10—400	$\delta > 18$; $\psi > 16$; $\varphi > 30$
Ti — 5,8Al — 1,3V — 1,7Nb	5—150	$\delta > 17$; $\psi > 15$; $\varphi > 33$
Ti — 5,85Al — 2,2V — 1,4Zr	3—50	$\delta > 15$; $\psi > 18$; $\varphi > 26$
Ti — 4,15Al — 1,3V	4—100	$\delta > 12$; $\psi > 21$; $\varphi > 57$
Ti — 4,55Al — 2,7V	1—40	$\delta > 12$; $\psi > 20$; $\varphi > 39$
ВТ6С	6—150	$\delta > 25$; $\psi > 30$
Ti — 5Al — 4V — 2Mo — 1,5Cr	100—600	$\delta > 15$; $\psi > 20$; $\varphi > 60$
Ti — 6Al — 2V — 2Mo — 2Sn — 2Zr	1—20	Пластические свойства низкие; $\delta > 10$; $\psi > 8$; $\varphi > 23$
Ti — 6Al — 2V — 2Mo — 8Zr	2—10	Пластические свойства низкие; $\delta > 8$; $\psi > 10$; $\varphi > 18$
Ti — 6Al — 4V — 2Sn	1—5	Пластические свойства низкие; $\psi > 10$; $\varphi > 18$
ВТ6	2—40	$\psi > 20$
ВТ14	2—15	$\psi > 20$; $\varphi > 30$
ВТ14	300—600	$\psi > 15$; $\varphi > 30$

Продолжение табл. 3

Тип сплава (состав, %)	Оптимальный интервал скоростей охлаждения	
	$\Delta v_{опт}$, °С/с	По каким свойствам выбран (ψ и δ%, φ°)
ВТ14М	1—8	$\psi > 13$; $\varphi > 30$
ВТ14М	400—600	$\psi > 10$; $\varphi > 30$
ВТ16	60—600	$\psi > 30$; $\varphi > 90$
ВТ22	100—600	$\delta > 10$; $\varphi > 45$; $\alpha_н > 5$ кгс·м/см² (после термообработки пластические свойства выравниваются)
ВТ15	6—600	$\psi > 30$
ВТ15	1—600	$\psi > 20$
СТ1	8—200	$\delta > 12$; $\psi > 14$
СТ4	—	Пластические свойства низкие;
СТ6	10—150	Пластические свойства низкие

Основные задачи при выборе технологии и режимов сварки таких сплавов: предупреждение высокотемпературного межкристаллитного разрушения сварных швов и околошовной зоны (горячих трещин); обеспечение заданного уровня прочности и пластичности металла шва и зоны термического влияния при отрицательных, комнатной или повышенных температурах; получение заданных характеристик длительной прочности, ползучести и коррозионной стойкости в условиях эксплуатации [1, 2, 4, 5].

Как правило, все эти материалы стремятся сваривать в условиях жестких режимов.

Одно из наиболее надежных средств предотвращения образования горячих трещин при сварке — повышение качества свариваемого металла: ограничение содержания кремния, бора, фосфора, серы и других примесей в аустенитной стали и никелевых сплавах [1,2], а также примесей внедрения в сплавах тугоплавких металлов. При сварке сплавов из тугоплавких металлов, как и при сварке сплавов титана и циркония, предусматривают эффективные меры защиты металла сварных соединений от насыщения примесями: струйную защиту инертными газами, сварку в камерах с контролируемой атмосферой, электронно-лучевую сварку.

Важное условие предупреждения горячих трещин — выбор соответствующего присадочного материала. При сварке аустенитных сплавов стремятся получить наплавленный металл, имеющий в своем составе вторую фазу в виде мелкодисперсных включений феррита, карбидов ниобия, термодинамически устойчивых нитридов типа TiN, тугоплавких оксидов. Легирование сварных швов аустенитной стали и никелевых сплавов большими количествами молибдена, вольфрама, тантала, при которых подавляется процесс высокотемпературного разрушения, эффективно только при условии жесткого ограничения содержания в сварочной ванне кремния, фосфора, серы, легкоплавких примесей и газов. Положительные результаты дает рафинирование металла сварочной ванны или модифицирование структуры шва с помощью галоидных или высокоосновных флюсов — шлаков [1,2].

Присадочные материалы для сварки сплавов алюминия должны содержать легирующие элементы, уменьшающие интервал кристаллизации и повышающие температуру затвердевания сплавов. Это достигается регулированием количества и распределения легкоплавкой эвтектики и введением в металл шва элементов, образующих с компонентами эвтектики более тугоплавкие перитектики [1, 3].

Окончательный выбор и корректирование состава присадочного материала производят по результатам технологических сварочных проб на горячие трещины,

4. Сопротивляемость образованию холодных трещин при сварке титановых сплавов (методика ИМЕТ-4)

Марка сплава и толщина образцов (состав, %)	Содержание газов, %			Зона, из которой взят образец	Свойства при статическом растяжении образца ИМЕТ-4		Критерии сопротивляемости замедленному разрушению		
	O_2	N_2	H_2		$\sigma_в$, кгс/мм²	ψ, %	$\sigma_{p\ min}$, кгс/мм²	$t_{p\ min}$, сутки	ψ перед началом разрушения (ψ_p), %	ψ после разрушения ($\psi_к$), %
ВТ14 с цирконием (3 мм)	0,11	0,04	0,006	Основной металл (отжиг 750 °С)	98—100	18—20	85—87	> 70	12—14	34—36
				Околошовная зона	122—123	6—8	120—122	> 70	4—6	5—9
ВТ14 с ванадием (3 мм)				Основной металл (отжиг 750 °С)	115—117	18—20	105—107	>>	12—14	22—24
				Околошовная зона	140—145	10—12	115—117	> 70	2—4	4—6
				Шов	104—107	16—18	88—90	> 70	10—12	15—17
				Околошовная зона	102—103	20—23	90—92	> 70	12—14	25—26
ВТ14 (аргонодуговая сварка с проволокой СПТ-2)	—	—	—	Основной металл (отжиг 600 °С)	122—129	24—26	97—98	12—20	17—19	32—34
				Околошовная зона	127—130	18—20	112—113	5—35	12—14	23—25
ВТ6С (3 мм)	0,12	0,04	0,008	Основной металл (отжиг 900 °С)	108—111	20—24	87—90	10—30	14—16	22—24
				Околошовная зона	120—122	18—20	100—102	10—12	10—12	20—22
Ti — 4,55 Al — 2,7 V (3 мм)	0,1	0,04	0,008	Основной металл (закалка 850 °С; отжиг 500 °С — 5 ч)	107—110	20—24	92—94	0,6—0,8	14—16	31—33
				Околошовная зона	120—122	22—24	107—109	2—5	9—11	30—32
				Основной металл	120—134	8—12	88—90	10—20	10—12	19—21
				Околошовная зона	128—138	6—8	105—107	10—20	10—12	20—22
Ti — 4,4 Al — 0,59 Mo — 0,73 Cr (2 мм)	—	—	—	Основной металл (отжиг 890 °С)	90—92	26—28	70—73	10—20	21—23	30—32
					108—111	20—21	85—87	6—10	19—21	30—32
Ti — 4,15 Al — 1,3 V (3 мм)	0,1	—	0,0083	Околошовная зона	81—82	40—42	56—57	45—55	25—28	42—44
				Основной металл	82—83	35—37	61—62	> 70	25—26	40—41
				Околошовная зона	81—82	34—35	54—55	3—4	22—23	32—33
Ti — 2,2 Al — 2,5 Zr (3 мм)	0,01	0,01	0,002	Основной металл	82—83	35—36	59—60	70	20—21	29—30
				Околошовная зона	82—83	31—32	53—54	3—4	18—19	33—34
				Основной металл	82—84	29—30	60—61	70	15—16	21—22
				Околошовная зона	79—80	37—38	57—59	70	18—19	41—42
	0,18	0,04	0,012	Основной металл	82—84	25—30	58—60	70	10—16	36—38
				Околошовная зона	84—95	18—20	54—56	50—60	10—12	31—32
				Основной металл	86—87	24—26	57—58	30—40	10—12	36—38
				Околошовная зона	85—86	31—32	47—48	10—25	8—12	31—32
	0,015			Основной металл	85—87	24—26	54—56	30—34	8—10	
				Околошовная зона						

Продолжение табл. 4

Марка сплава и толщина образцов (состав, %)	Содержание газов, %			Зона, из которой взят образец	Свойства при статическом растяжении образца ИМЕТ-4		Критерии сопротивляемости замедленному разрушению			
	O_2	N_2	H_2		$\sigma_в$, кгс/мм²	ψ, %	$\sigma_{p\ min}$, кгс/мм²	t_p при $\sigma_{p\ min}$, сутки	ψ перед началом замед. разрушения (ψ_p), %	ψ после разрушения ($\psi_к$), %
Ti — 2,2 Al — 2,5 Zr (3 мм)	0,09		0,0025	Основной металл	100—102	38—39	74—75	70	20—21	34—35
				Околошовная зона	103—114	27—28	82—83	70	16—17	22—23
				Основной металл	103—104	18—20	71—72	40—50	12—13	17—18
				Околошовная зона	115—116	8—15	74—75	30—40	9—10	12—14
			0,014	Основной металл	104—105	19—20	74—77	28—32	6—7	14—15
				Околошовная зона	111—113	20—21	79—80	30—34	15—16	20—22
	0,13—0,14		0,002	Основной металл	87—94	26—32	68—69	0,3—1	15—17	32—39
				Околошовная зона	88—90	24—32	69—70	3—5	15—20	29—33
	0,45			Основной металл	112—114	18—19	82—83	3—4	9—10	29—33
Ti — 3,7 Al (3 мм)		0,04		Околошовная зона	113—116	18—24	84—85	4—7	7—8	20—21
	0,12		Вакуумный отжиг при 950°	Основной металл	90—94	24—28	83—85	18—20	15—17	20—24
				Околошовная зона	100—104	20—24	85—87	6—10	12—14	18—20
				Основной металл	92—93	21—29	73—75	20—30	10—15	14—16
				Околошовная зона	102—103	20—24	85—87	6—10	10—15	11—14
ОТ4-1 (2 мм)			0,003	Основной металл (отжиг 500 °С)	103—108	29—31	79—80	0,8—8	9—10	24—28
	0,13		0,04	Околошовная зона	104—108	24—25	81—83	1—30	6—8	18—23
АТ4 (3 мм)		0,012		Основной металл (отжиг 900 °С)	102—104	6—8	52—53	0,04—1	0—1	0—2
					86—110	22—23	78—80	20—30	4—6	10—14
АТ2-3 (3 мм)	0,12	0,04	0,011	Околошовная зона	90—115	8—10	77—80	20—30	2—4	6—8
				Основной металл (отжиг 650 °С)	105—110	26—36	80—82	30—50	20—23	40—44
АТ2-1 (3 мм)		0,038	0,052	Околошовная зона	104—100	28—30	68—70	20—30	6—8	14—16
				Основной металл (отжиг 600 °С)	100—105	32—34	85—87	>70	12—20	34—36
ВТ6 (3 мм)	0,2	0,03	0,01	Околошовная зона	115—117	12—14	40—45	3—4	4—6	7—11
		0,1			146—151	7—9	124—126	32—38	0—2	0—3
					160—165	2—4	103—104	0,8—7	0	0
	0,3—0,4	0,03	0,05	Околошовная зона	143—146	0	55—56	0,8—30	0	0
	0,2				142—148	1—2	91—93	0,1—7	0	0
ВТ14М (3 мм)	0,14	0,045	0,011		123—128	9—11	119—120	0,5—1	0	0
				Околошовная зона сварки закалка 860 °С 15 мин и старение 500 °С — 16 ч) (после	138—142	6—8	131—132	1—5	5—7	11—13

а также по результатам коррозионных и механических испытаний сварных соединений.

При выборе режимов сварки данной группы сплавов необходимо соблюдение двух условий: предупреждение высокотемпературного межкристаллитного разрушения сварных соединений; получение минимальной зоны разупрочнения (для термически упрочняемых алюминиевых сплавов) или минимальной зоны повышенной хрупкости в месте сварки (для сплавов молибдена, вольфрама, хрома).

Влияние режимов сварки на образование горячих трещин неоднозначно. Уменьшение величины погонной энергии, увеличение скорости охлаждения металла шва способствуют подавлению зональной ликвации, измельчению зерна, уменьшению величин внутренних деформаций и в этом смысле благоприятно сказываются на технологической прочности соединений. Однако те же причины могут вызвать образование менее благоприятно ориентированной структуры шва и увеличение темпа нарастания внутренних деформаций.

Соотношение этих факторов при выбранном режиме сварки определяет сопротивление сварных соединений образованию горячих трещин и соответственно оптимальный интервал режимов (по $\Delta v_{опт}$) для соединений данного уровня жесткости. Все это в равной степени относится и к такому технологическому приему, как предварительный и сопутствующий подогрев изделий при сварке.

Режимы сварки не оказывают резкого влияния на механические свойства аустенитной стали, однако увеличение размеров сварочной ванны нежелательно, так как в этом случае снижается коррозионная стойкость соединений в связи с появлением четко выраженной ликвационной зоны и зон выпадания карбидов и некоторых других фаз из твердого раствора.

При сварке нагартованных сплавов ниобия и тантала, а также термически не обрабатываемых сплавов алюминия (АМг, АМг3, АМг5, АМг6, АМц и др.) в зоне термического влияния наблюдается некоторое разупрочнение, связанное с рекристаллизацией обработки. При сварке сплавов в отожженном состоянии сварные соединения равнопрочны основному металлу. Для повышения пластичности сварных соединений сплавов ниобия, склонных к старению, проводят отжиг после сварки для перестаривания. Другие сплавы не требуют термической обработки.

Сплавам вольфрама, хрома и молибдена свойственно резкое охрупчивание при сварке вследствие образования в зоне сварочного нагрева литой и рекристаллизованной структуры. Для уменьшения размеров зоны хрупкости и ограничения роста зерна в этой зоне сварку сплавов рекомендуют выполнять при минимально возможной погонной энергии и в импульсных режимах с использованием различных теплоотводящих устройств.

По характеристикам кратковременной и длительной прочности сварные соединения сплавов вольфрама, хрома и молибдена не отличаются от основного металла в рекристаллизованном состоянии.

Важную технологическую проблему представляет сварка высокопрочных стареющих сплавов на основе алюминия (АВ, АВ5, АК6, АК6-1, Д20, В95 и др.). При выборе режимов сварки сплавов стремятся ограничить перегрев жидкого металла, сократить продолжительность пребывания сварочной ванны в жидком состоянии, сократить пребывание металла зоны термического влияния при высоких температурах. При этом повышается сопротивление шва и околошовной зоны хрупкому разрушению и уменьшается степень разупрочнения основного металла вблизи шва. Эти условия обеспечиваются при использовании источников тепла большой интенсивности, позволяющих вести сварку с повышенной скоростью. Жесткие режимы сварки способствуют также уменьшению пористости. После сварки проводят полную термическую обработку сварных конструкций: закалку + искусственное старение для сплавов типа АВ; отжиг перед сваркой, закалку + искусственное старение для сплава Д20; закалку + естественное старение для сплавов Д1 и Д16; длительный гомогенизирующий отжиг + естественное старение для сплава В95 [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Горячие** трещины при сварке жаропрочных сплавов М., «Машиностроение», 1973, 224 с. Авт. М. Х. Шоршоров и др.
2. **Каховский Н. И.** Сварка высоколегированных сталей. Киев, «Техника», 1975, 228 с.
3. **Никифоров Г. Д.** Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов. М., «Машиностроение», 1972, 264 с.
4. **Прохоров Н. Н.** Физические процессы в металлах при сварке. Т. 1. М., «Металлургия», 1968 и т. 2, М., «Металлургия», 1976, 325 с.
5. **Шоршоров М. Х., Чернышова Т. А., Красовский А. И.** Испытания металлов на свариваемость. М., «Металлургия», 1972, 240 с.
6. **Шоршоров М. Х.** Металловедение сварки стали и сплавов титана. М., «Наука», 1965, 336 с.
7. **Шоршоров М. Х.** Термопластическое упрочнение мартенситных сталей и сплавов титана. М., «Наука», 1971, 152 с.
8. **Шоршоров М. Х., Белов В. В.** Фазовые превращения и изменения свойств стали при сварке. М., «Наука», 1972, 220 с.
9. **Шоршоров М. Х., Мещеряков В. Н.** Фазовые превращения и изменения свойств сплавов титана при сварке. М., «Наука», 1973, 159 с.

Глава 5

СВАРИВАЕМОСТЬ И СТРУКТУРА МЕТАЛЛА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Свариваемость — технологическое свойство материалов (металлов) или их сочетаний образовывать в процессе сварки соединения отвечающие конструктивным и эксплуатационным требованиям к ним. Как правило, конструктивные и эксплуатационные требования, предъявляемые к сварным соединениям, определяются свойствами используемых материалов, поэтому часто под свариваемостью понимают способность материалов образовывать в процессе сварки соединения, не уступающие по своим свойствам свариваемым материалам.

В общем случае свариваемость материала есть комплексное свойство и оно тем выше, чем проще технология сварки, чем большее количество способов сварки может быть использовано для соединения материала, чем шире область параметров режимов, обеспечивающих заданные требования к свойствам соединения, чем шире номенклатура изделий, для которых могут быть использованы сварные соединения из данного материала.

Как и всякое комплексное свойство, свариваемость определяется составом и физическими свойствами материала.

К факторам, наиболее сильно влияющим на свариваемость, следует отнести:

химический состав материала, который определяет его температурный интервал кристаллизации, фазовый состав и фазовые и структурные превращения на этапе нагрева и охлаждения;

теплофизические свойства, которые определяют область и степень завершенности процессов превращений, проходящих в материалах под воздействием сварочного цикла;

механические свойства, которые определяют способность материала воспринимать механические воздействия (напряжения), возникающие за счет неравномерности нагрева и охлаждения, жесткости конструкций и других факторов, без разрушения;

специальные физико-химические свойства, которые определяют активность физико-химических реакций, протекающих в сварочной ванне и зоне термического влияния.

В общем плане несвариваемых материалов нет, однако чем хуже свариваемость материала, тем сложнее технология сварки, тем больше мероприятий необходимо применять для получения качественного сварного соединения.

При разработке технологии сварки конкретной конструкции необходимо учитывать как свойства материала, так и те изменения, которые могут наблюдаться при сварке в материале сварного соединения. В свою очередь, эти изменения определяются технологическими параметрами выбранного способа сварки (концентрацией источника нагрева, скоростью сварки и др.); составом и температурой окружающей среды; составом используемых при сварке дополнительных материалов — флюсов, присадочной проволоки, газов защитных и инертных; характером подготовки деталей под сварку (разделкой кромок, подготовкой поверхности и др.); конструкцией изделия (его жесткостью, наличием остаточных напряжений, концентраторов и т. д.); пространственным положением осуществляемого процесса сварки.

Особенно важно учитывать перечисленные технологические факторы в связи с тем, что сварочный процесс имеет существенные особенности, обусловливающие

более сильное влияние перечисленных факторов на свойства, чем в случае использования других технологических процессов получения деталей.

Особенности термического воздействия: неравномерный нагрев (градиент температуры при сварке в зависимости от способа изменяется от сотен градусов до нескольких тысяч градусов на миллиметр);

высокие температуры нагрева в зоне действия источника тепла, достигающие температуры испарения материала при лучевых способах сварки;

большие скорости нагрева и охлаждения (от десятков до тысяч градусов в секунду). Для большинства способов сварки скорости нагрева и охлаждения металла в шве и зоне термического влияния выше, чем при наиболее жестком цикле термической обработки — закалке.

Металлургические особенности: относительно малая масса расплавляемого металла (от нескольких киллограммов при электрошлаковой сварке до сотен долей грамма при сварке микродеталей);

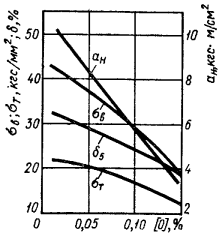


Рис. 1 Влияние кислорода на механические свойства низкоуглеродистой стали (предел прочности $\sigma_в$; предел текучести $\sigma_т$; относительное удлинение δ_5; ударная вязкость $a_н$)

большая поверхность расплавленного металла по отношению к его объему (0,5—100 1/мм); это определяет существенное влияние реакций, проходящих на поверхности сварочной ванны на изменение свойств металла во всем объеме сварного шва;

активность химических и физических процессов взаимодействия расплавленного металла с окружающей средой и сварочными материалами, обусловленная в значительной степени высокой температурой.

Особенности механического воздействия: возникновение в сварных соединениях напряжений, достигающих во многих случаях предела текучести;

воздействие на сварное соединение остаточных напряжений, существовавших в свариваемой конструкции ранее.

Не весь комплекс рассматриваемых особенностей оказывает влияние во всех случаях сварки материалов. Однако в большинстве случаев наиболее важными, с точки зрения конечных свойств сварного соединения, являются: изменение химического состава, структуры и свойств материала в зоне соединения; уровень напряжений и деформаций, существующих или возникающих в процессе сварки в зоне соединения.

Изменение химического состава и распределения элементов в сварном соединении. Изменение химического состава определяется активностью свариваемого материала, составом окружающей атмосферы, чистотой кромок перед сваркой и диффузионными процессами, происходящими в сварочной ванне и околошовной зоне. Существенное влияние на изменение состава металла и его свойства оказывают реакции взаимодействия расплавленного металла с кислородом, азотом и водородом.

Так, при увеличении содержания кислорода в низкоуглеродистой стали наблюдается резкое снижение прочностных и пластических свойств (рис. 1). Увеличение содержания азота приводит к повышению прочности, но снижает пластичность. Кроме того, резкое уменьшение растворимости этих газов с понижением температуры сопровождается образованием пор. Водород во многих случаях снижает работоспособность металла в условиях длительной прочности, так как приводит в этих условиях к образованию флокенов, а в процессе охлаждения может способствовать образованию холодных трещин.

Источником кислорода и водорода могут быть не только атмосфера, но и окислы, адсорбированные газы и влага, содержащиеся на поверхности свариваемых деталей, присадочных материалов и др. Основными методами борьбы с вредным влиянием кислорода, азота и водорода являются ограничение их содержания

в металле путем снижения парциального давления этих газов в атмосфере, связывание их в стойкие при высокой температуре соединения и удаление их из металла в шлак за счет металлургических реакций в сварочной ванне.

Неравномерность химического состава шва и околошовной зоны определяется специфическими условиями кристаллизации металла шва и диффузионными процессами обмена элементами между швом и зоной термического влияния (см. гл. 4).

Строение сварного соединения. Структура сварного соединения определяется исходной структурой свариваемых материалов, характером физического воздействия на него и степенью завершенности фазовых и структурных превращений, протекающих при сварке.

Наибольшее количество структурных изменений при сварке наблюдается в металлах, претерпевающих полиморфные превращения. В зависимости от наличия полиморфных превращений все металлы могут быть разделены на три группы: металлы, имеющие полиморфные превращения, сопровождающиеся существенным изменением объема $\approx 3 \div 5\%$ (сталь перлитного и мартенситного классов, сплавы циркония и др.); металлы, имеющие полиморфные превращения, не сопровождающиеся существенным изменением объема $\approx 0{,}15\%$ (сплавы титана); металлы, не имеющие полиморфных превращений (тугоплавкие металлы и некоторые сплавы цветных металлов).

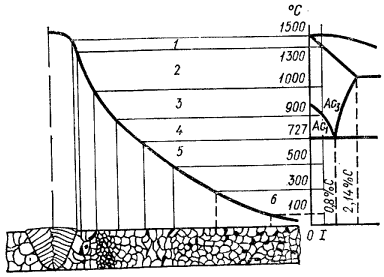


Рис. 2. Схема строения сварного соединения при сварке стыкового шва:

1 — зона сплавления; *2* — участок перегрева; *3* — участок полной перекристаллизации; *4* — зона частичной перекристаллизации; *5* — зона высокотемпературного отпуска; *6* — зона низкотемпературного отпуска и механического влияния [3]

Однако вне зависимости от наличия или отсутствия у металла полиморфного превращения при сварке плавлением в сварном соединении можно выделить три основные области. Первая — это область, где металл был нагрет до температуры выше линии солидуса и находился в жидком или твердо-жидком состоянии; вторая — область термического влияния, где температура нагрева была достаточна для полного или частичного протекания фазовых превращений или процессов рекристаллизации, и третья — область механического или термомеханического влияния, где температура нагрева металла и время его пребывания при этой температуре недостаточны для протекания процессов фазовых превращений и рекристаллизации. В этой области сварного соединения сохраняются изменения, вызванные пластической и упругой деформацией металла под действием сварочных напряжений. За этой областью следует основной металл, в котором в результате сварки возникают напряжения, не сопровождающиеся пластической деформацией металла. При сварке без расплавления (давлением) наблюдаются только последние две области, при этом возрастает роль пластической деформации.

Строение сварного соединения может быть показано на примере зон структурных изменений при сварке углеродистой стали *1* (рис. 2). Металл шва имеет характерное дендритное строение, размеры, форма, степень химической однородности и направленность которого определяются условиями сварки и свойствами свариваемого материала. В этой зоне металл нагревается до температуры выше линии ликвидуса, что и определяет интенсивное развитие химических реакций

и металлургических процессов между металлом шва и газами атмосферы, а также сварочными материалами: флюсами, электродными покрытиями, защитными газами и др.

В металлах, не претерпевающих структурных и фазовых превращений, структура металла шва определяется его первичной кристаллизацией и представляет характерные столбчатые кристаллы, выросшие от линии сплавления к центру шва. Существенные изменения в микроструктуре, полученной от первичной кристаллизации, происходят в металлах, претерпевающих фазовые и структурные превращения в твердом состоянии, хотя и в этом случае свойства металла шва во многом определяются его первичной структурой.

Металл шва — зона сварного соединения, где вследствие характерных особенностей кристаллизации и активности физико-химических процессов возможны наибольшее изменение химического состава металла, наибольшая его неоднородность, а также наиболее вероятно образование дефектов сварного соединения, таких как поры (в стали всех классов, медных и алюминиевых сплавах и др), горячие и холодные трещины (в высоколегированной стали, титановых сплавах, цветных металлах и др.) и т. д. (см. гл. 4).

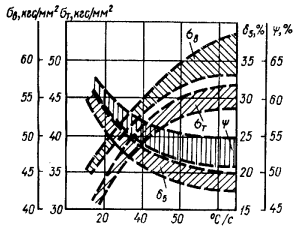


Рис. 3. Зависимость между скоростью охлаждения и механическими свойствами металла шва

Значительные изменения состава металла в этой зоне могут происходить при сварке химически активных и тугоплавких металлов (титана, циркония, вольфрама, молибдена и их сплавов).

Никель и никелевые сплавы в расплавленном состоянии растворяют большое количество газов (азота, водорода и кислорода), которые, выделяясь при кристаллизации и охлаждении, могут приводить к образованию пор. Большое влияние на качество металла шва оказывает сера. Охрупчивающее действие серы связано с выделением легкоплавкой эвтектики сульфида железа с железом при сварке стали или сульфида никеля с никелем при сварке никелевых сплавов, выделяющейся по границам зерен. Активное образование сульфида никеля наблюдается уже при температуре выше 400° С.

Непосредственно к металлу шва примыкает зона сплавления, где металл был нагрет до температуры в интервале между температурами ликвидуса и солидуса, т. е. находился в твердо-жидком состоянии. Ширина этой зоны зависит от состава металла, т. е. температурного интервала кристаллизации сплава в равновесных условиях и температурного режима нагрева и охлаждения, т. е. от положения неравновесных температур ликвидуса и солидуса. Это зона, где так же, как в шве, наблюдается существенное изменение химического состава и свойств металла под действием цикла сварки как за счет особенностей кристаллизации, так и вследствие протекания диффузионных процессов.

В первой (шов) и второй (зона сплавления) зонах наблюдается наибольшее изменение химического состава, структуры и свойств металла. Так, например, изменение строения перлита в этих зонах в малоуглеродистых сталях, обусловленное высокими скоростями охлаждения, приводит к снижению пластичности и увеличению прочности металла шва (рис. 3.). В аустенитной стали в этих зонах могут возникать горячие трещины, которые в большинстве случаев связаны с первичной кристаллизацией, широким температурным интервалом кристаллизации, резким снижением пластических свойств в этом температурном интервале.

При сварке разнородной стали структура металла шва претерпевает существенные изменения и может быть определена по структурной диаграмме (рис. 4) с учетом процессов перемешивания электродного и основного металлов, доли участия их в формировании шва и др.

Особое внимание следует уделять зоне сплавления при сварке разнородных материалов, так как, наряду с изменением химического состава металла в процессе кристаллизации, в этой зоне вследствие существенного градиента концентраций могут развиваться активные диффузионные процессы, приводящие к образованию прослоек переменного состава малой толщины (0,2—0,6 мм).

При сварке стали одного структурного класса свойства прослоек, как правило, являются промежуточными между свойствами шва и свариваемых материалов. При сварке стали различных структурных классов или при сварке стали перлитного класса аустенитными швами в зоне сплавления образуются прослойки, обладающие мартенситной структурой. Ширина этих прослоек тем больше, чем меньше запас аустенитности шва, определяемый в большинстве случаев содержанием никеля. И в тех случаях, когда используются швы на никелевой основе, образование мартенситных прослоек практически исключается. Образование в легированной части зоны сплавления прослоек с высокой твердостью определяется и диффузией углерода из нелегированного металла в металл, содержащий сильные карбидообразующие элементы.

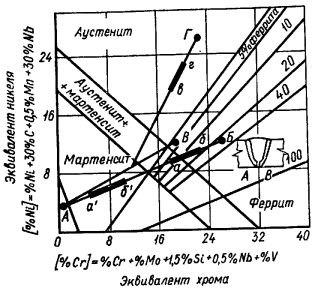


Рис. 4. Структурная диаграмма фазового состава шва при наплавке и сварке стыкового шва в зависимости от эквивалента хрома и никеля:

а—б — структура первого слоя при наплавке на сталь состава *А* электродами состава *Б*; *а′—б′* — структура первого слоя при наплавке на сталь состава *Б* электродами состава *А*; *в—г* — структура металла шва при однопроходной сварке разнородных сталей составов *А* и *В* электродами состава *Г*

Этот же процесс приводит к образованию в зоне сплавления со стороны менее легированного металла обезуглероженной прослойки пониженной прочности. Если после сварки ширина такой обезуглероженной прослойки невелика, то термическая обработка или работа сварного соединения при повышенных температурах (>800° С) приводят к заметному увеличению ее ширины. Наличие диффузионных прослоек отрицательно сказывается на свойствах и напряженном состоянии металла сварного соединения, приводит к малопластичному разрушению при комнатных и умеренных температурах, снижению коррозионной стойкости, длительной прочности и др.

При сварке разнородных сплавов, обладающих ограниченной растворимостью (сталь — алюминий, медь — титан и др.), основное влияние на свойства сварного соединения оказывают хрупкие интерметаллические прослойки. Физические свойства таких прослоек существенно отличаются от свойств свариваемых металлов. Они имеют другие коэффициенты термического расширения, что способствует концентрации напряжений в месте их выделения; высокую твердость и малую пластичность, что приводит к образованию трещин на всех этапах изготовления и эксплуатации изделия; в местах их выделения часто наблюдается интенсивное коррозионное разрушение. Для образования таких интерметаллических прослоек необходимы, как правило, продолжительное время и высокие температуры. Поэтому в отдельных случаях при правильном подходе к выбору технологии сварки удается получать соединения, отвечающие предъявляемым требованиям. Основным мероприятием в этом направлении является снижение температуры и времени нагрева соединяемых материалов; хорошая защита зоны соединения и тщательная подготовка поверхности соединения; нанесение на поверхность соединяемых элементов промежуточных металлов, не образующих химических соединений ни с одним из рассматриваемых сплавов; введение в состав

металла шва элементов, препятствующих образованию интерметаллических соединений.

Перспективными способами сварки разнородных сплавов могут являться сварка взрывом, ультразвуком, трением, диффузионная, а также вакуумные способы сварки, обеспечивающие высокую концентрацию энергии в зоне нагрева, электронно-лучевая и лазерная. При использовании лучевых способов сварки возможно строгое регулирование доли участия каждого из соединяемых материалов в формировании сварного шва.

Особые требования, в некоторой степени противоположные требованиям, выдвигаемым при сварке поликристаллических материалов,предъявляют к металлу шва и зоне сплавления в случае сварки монокристаллических материалов. При сварке поликристаллов образование в металле шва равноосных произвольно ориентированных кристаллов в большинстве случаев рассматривают как положительное явление. При сварке монокристаллов основным требованием является сохранение кристаллографической ориентации металла шва соответствующей кристаллографической ориентации свариваемых пластин. Образование в металле шва значительной разориентации (более 5°) и тем более равноосных зерен с произвольной кристаллографической ориентацией резко ухудшает работоспособность сварных соединений и снижает их эксплуатационные характеристики.

Как показали исследования по сварке монокристаллов тугоплавких металлов, основными причинами нарушения монокристаллической структуры металла шва могут явиться повышенное содержание примесей, находящихся в металле перед сваркой или попадающих в металл шва в процессе сварки, и термические циклы сварки, сопровождающиеся существенным искажением осей растущих кристаллитов, в результате чего в процессе роста может наблюдаться существенное отклонение кристаллографических осей растущих кристаллитов от соответствующих кристаллографических направлений основного металла (затравки).

Успешные результаты по сварке [5] монокристаллов тугоплавких металлов толщиной около 1—1,5 мм были получены при использовании электронно-лучевой сварки на режимах, обеспечивающих высокие скорости сварки (>70 м/ч), малую протяженность растущих субзерен и малую степень искривления их осей в процессе роста. При этих режимах углы разориентировки θ по центральной субгранице, образующейся на стыке растущих от линии сплавления субзерен, не превышают 2—3 ° (рис. 5). Испытания на прочность при изгибе сварных соединений монокристаллов вольфрама и основного металла показали, что прочность сварных соединений, выполненных со скоростями сварки более 70 м/ч, не ниже, а при некоторых ориентациях пластин и выше, чем прочность несваренных монокристаллов (рис. 6).

Ко второй зоне примыкает зона нагрева стали до температуры выше температуры фазовых превращений (температура в интервале от Ac_3 до линии солидуса). Общей характеристикой этой зоны является то, что в металле зоны могут происходить полные структурные и фазовые превращения, характерные для металла. В этой достаточно широкой температурной зоне может быть выделено несколько участков. Непосредственно к зоне сплавления прилегает участок нагрева металла до температуры, близкой к температуре линии солидуса, и выше 1000° С — участок перегрева. Так же как в зоне сплавления, на этом участке наблюдается существенное изменение состава и свойств металла. Зона сплавления и участок перегрева — это места вероятного образования горячих и холодных трещин в сплавах, склонных к такого рода дефектам. В низкоуглеродистой стали в зоне нагрева с температурой более 1000° С наблюдается существенный рост зерна, особенно при электрошлаковой и газовой сварках, а иногда и образование видманштеттовой структуры.

К этой зоне относится и второй участок — полной перекристаллизации. На этом участке металл был нагрет до температуры выше температуры фазовых превращений, однако температура нагрева и время пребывания металла при этой температуре были таковы, что существенного роста зерна не наблюдалось. Общим для всех зон металла, нагреваемого при сварке до температуры выше температуры

фазовых превращений, является образование в закаливающихся сплавах закалочных структур, что приводит к снижению пластических свойств металла и при определенных условиях к образованию хрупкого разрушения как в процессе формирования сварного соединения (холодные трещины), так и в процессе эксплуатации изделий.

Наибольшую опасность образование закалочных структур представляет для углеродистой стали с содержанием углерода более 0,3%, низколегированной и среднелегированной стали, титановых сплавов и др., причем при том же содержании углерода чувствительность стали к образованию закалочных структур (мартенсита) и склонность к образованию трещин тем выше, чем больше в стали содержится легирующих элементов. Степень влияния отдельных легирующих

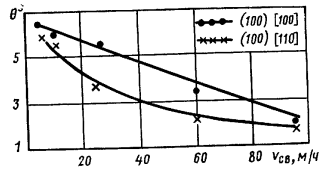


Рис. 5. Изменение угла разориентировки θ° по центральной субгранице монокристаллического сварного шва в зависимости от скорости сварки $v_{св}$

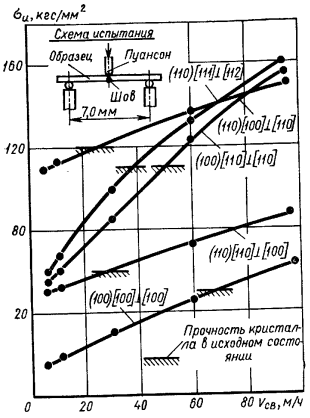


Рис. 6. Изменение прочности сварных соединений при изгибе $\sigma_и$ в зависимости от скорости сварки $v_{св}$

элементов различна и может быть оценена по различным признакам, одним из которых является эквивалент по углероду. Наиболее распространенная формула для подсчета эквивалента по углероду

$$C_э = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{V}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2}.$$

При величине $C_э$ = 0,45% сталь склонна к образованию трещин при сварке и требуются специальные технологические мероприятия для устранения этого нежелательного явления. Эти мероприятия в основном сводятся к следующему.

1. Создание термического цикла сварки, устраняющего образование закалочных структур (предварительный и сопутствующий подогрев, сварка короткими участками и др.). При сварке с предварительным и сопутствующим подогревом в зависимости от состава сплава температура подогрева колеблется от нескольких десятков до нескольких сотен градусов. В случае сварки с предварительным подогревом снижается мгновенная скорость охлаждения при всех температурах и особенно в области температур наименьшей устойчивости аустенита. При сварке с сопутствующим подогревом можно задавать любую скорость охлаждения в интервале температур фазовых и структурных превращений.

2. Снижение содержания водорода в металле сварного соединения (улучшение защиты металла сварочной ванны, тщательная подготовка поверхности свариваемых кромок и сварочных материалов, использование флюсов и электродных обмазок с низким содержанием водорода и его соединений и др.).

3. Термическая обработка сваренного изделия непосредственно после сварки.

4. Применение технологических приемов, снижающих остаточные напряжения (сварка каскадом, применение приспособлений, создающих напряжения сжатия, и др.).

Четвертой зоной сварного соединения является зона нагрева металла до температуры от линии Ac_1 до линии Ac_3 — зона частичной перекристаллизации. Структурные изменения в этой зоне, как правило, не оказывают существенного влияния на свойства сварного соединения при сварке стали в состоянии после отжига. Однако эти изменения следует учитывать в тех случаях, когда производят сварку закаленного металла, так как в этой зоне вследствие распада закалочных структур происходит разупрочнение металла.

Такое же явление наблюдается и в зоне нагрева металла до температур более 500° С, но ниже температуры линии Ac_1, — зоне высокотемпературного отпуска или рекристаллизации (зоне старения для некоторых материалов).

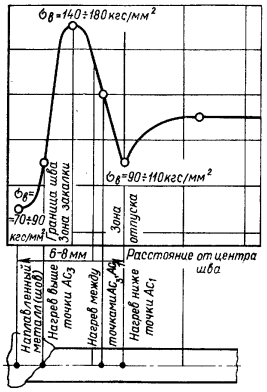


Рис. 7. Зона теплового воздействия и изменения твердости при дуговой сварке стали 30ХГСА

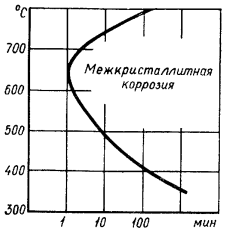


Рис. 8. Влияние температуры нагрева и времени выдержки на склонность стали 12Х18Н9 к межкристаллитной коррозии [1]

В этой зоне наблюдается разупрочнение металла, свариваемого в состоянии после упрочняющей термообработки (закалки или закалки с последующим низкотемпературным отпуском и др.) или в наклепанном состоянии (рис. 7). При сварке углеродистой стали (до 0,3% С) в этой зоне может иметь место снижение ударной вязкости, связанное со старением после закалки или с дисперсионным твердением.

Зона нагрева металла до температуры, близкой к Ac_1, является слабым участком (участком разупрочнения) при сварке термически упрочняемой стали перлитного и мартенситного классов как при комнатных, так и при высоких температурах. В связи с этим длительная прочность сварных соединений термически упрочняемой стали может быть существенно ниже длительной прочности основного металла. Это объясняется большей, чем при комнатной температуре, локализацией разрушения по мягкой прослойке (зоне разупрочнения) при высоких температурах.

Зоны нагрева стали в интервале температур 500—900° С опасны и с точки зрения коррозионного разрушения. В этих зонах происходит преимущественное растрескивание сварных соединений нержавеющей стали в хлоридах. В аустенитной нержавеющей стали некоторых марок в зоне нагрева металла в интервале температур 500—800° С и в зонах нагрева до больших температур на этапе охлаждения может развиваться процесс образования карбида хрома ($Cr_{23}C_6$) по границам зерен, в результате чего границы и приграничные области обедняются хромом. При работе сварного соединения в коррозионной среде по этим областям развивается коррозионное разрушение — межкристаллитная коррозия.

Склонность стали к коррозионному разрушению определяется химическим составом и длительностью выдержки в опасном интервале температур (рис. 8).

Основным направлением борьбы с межкристаллитной коррозией является предотвращение выделений хрома из твердого раствора в аустените.

При сварке это может быть осуществлено за счет снижения содержания углерода в металле шва; использования для сварки в качестве основного и присадочного металла стали, стабилизированной титаном, ниобием, цирконием и другими элементами, обладающими бо́льшим сродством к углероду, чем хром; снижения времени пребывания стали в опасном интервале температур; за счет жестких режимов сварки или закалки после сварки с температуры 1050—1100° С; дополнительного легирования хромом металла сварного шва.

Шестой зоной является зона нагрева металла до температуры существенно ниже температуры фазовых превращений (100—300° С). В этой зоне у некоторых металлов может наблюдаться снижение пластических свойств и ударной вязкости за счет старения металла или его наклепа вследствие пластической деформации и отсутствия процесса рекристаллизации.

В общем случае влияние таких изменений на свойства сварного соединения незначительно, однако в отдельных случаях эта зона может обладать худшими коррозионными свойствами, повышенной твердостью, худшей длительной прочностью. Кроме того, в зоне наблюдается повышенная плотность дефектов кристаллического строения.

За этой зоной следует основной металл, не претерпевающий изменений в процессе сварки. Единственным результатом воздействия на него процесса сварки является возникновение в нем остаточных напряжений, не превышающих предела текучести.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Основы** материаловедения. Под ред. д-ра техн. наук проф. И. И. Сидорина. М., «Машиностроение», 1976, 436 с.

2. **Теоретические** основы сварки. Под ред. д-ра техн. наук проф. В. В. Фролова. М., «Высшая школа», 1970, 592 с.

3. **Технология** электрической сварки плавлением. Под ред. акад. Б. Е. Патона. Москва—Киев, Машгиз, 1962, 663 с.

4. **Шоршоров М. Х., Чернышова Т. А., Красовский А. И.** Испытание металлов на свариваемость. М., «Металлургия», 1972, 240 с.

5. **Электронно-лучевая** сварка монокристаллов тугоплавких металлов. — В кн.: Выращивание монокристаллов тугоплавких и редких металлов. М., «Наука», 1973, с. 68—73. Авт.: Н.А. Ольшанский и др.

Глава 6

СВАРКА ПЛАВЛЕНИЕМ

РУЧНАЯ ДУГОВАЯ СВАРКА ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

Техника сварки. При зажигании дуги напряжение между электродом и свариваемым изделием обычно равно 60 В, для электродов отдельных промышленных марок напряжение холостого хода должно быть повышено до 70 В. При замыкании сварочной цепи напряжение падает почти до нуля и после возбуждения дуги поддерживается в пределах 16—30 В в зависимости от длины дуги и марки электрода.

На рис. 1 приведена статическая характеристика дуги. Точка A соответствует моменту зажигания дуги; точка $Б$ — точка устойчивого горения дуги.

Основными характеристиками процесса плавления электрода является количество расплавленного электродного металла $g_э$ и относительные потери ψ (коэффициент потерь) электродного металла в процессе сварки из-за разбрызгивания, испарения и окисления.

При установившемся процессе сварки плавление электрода под действием дуги происходит равномерно по следующей приближенной зависимости, установленной опытным путем при большой плотности тока:

$$g_э = \alpha_р I t,$$

где $\alpha_р$ — коэффициент расплавления, определяемый опытным путем, г/А·ч; I — сила тока, А; t — время горения дуги, ч.

Коэффициент расплавления зависит от материала электродного стержня и состава обмазки, покрывающей его поверхность, от рода и полярности тока и колеблется в пределах 8—14 г/А·ч. При сварке на постоянном токе он несколько повышается.

Потери наплавленного металла, определенные разностью массы $g_э$ расплавленного металла электрода и массы $g_н$ металла, образующего шов, определяются коэффициентом

$$\psi = \frac{g_э - g_н}{g_э}.$$

Величина $g_э$, возрастающая с увеличением тока, меняется в пределах 5—30% для обычных электродов. Коэффициент ψ также зависит от стабильности процесса сварки и особенностей отрыва и переноса капель через дуговой промежуток.

Коэффициент расплавления $\alpha_р$ изменяется незначительно с повышением плотности тока. В процессе сварки электродами на токе большей плотности скорость плавления увеличивается за счет подогрева стержня током.

Приближенно можно принять, что масса наплавленного металла на изделие

$$g_н = \alpha_н I t,$$

где $\alpha_н$ — коэффициент наплавки, г/А·ч.

Коэффициент наплавки $\alpha_н$ менее постоянен, чем коэффициент расплавления $\alpha_р$, так как потери меняются от действия различных факторов, в результате которых увеличиваются потери на разбрызгивание и угар. Для электродов с толстым покрытием различных марок коэффициент наплавки $\alpha_н$ изменяется в пределах 7—14 г/А·ч. Не вся мощность дуги используется для наплавки металла, так как неизбежны потери ее на излучение, конвективный теплообмен с окружающей средой, потери вместе с испаряющимся и разбрызгиваемым металлом, унос теплоты нагретыми газами, на плавление электродного покрытия и др.

Эффективная мощность дуги, т. е. мощность, расходуемая на нагрев металла, определяется по формуле

$$Q_э = \eta_{эф} Q_0,$$

где $\eta_{эф}$ — эффективный КПД процесса нагрева металла, определяемый опытным путем методом калориметрирования. Для плавящихся электродов с толстым покрытием $\eta_{эф} = 0{,}70 \div 0{,}85$.

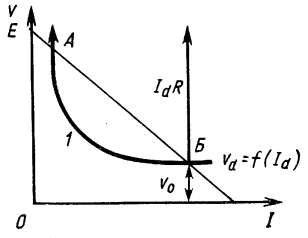


Рис. 1

Значительное ускорение плавления металла электрода во многих случаях нежелательно, так как нарушаются нормальные соотношения между количеством расплавленного основного и электродного металла, что приводит к нарушению формирования шва и является одним из факторов, определяющих силу тока дуги для данного электрода

Валик наплавленного металла (рис. 2) характеризуется глубиной расплавления $h = 2 \div 6$ мм, высотой $H = 2 \div 5$ мм, шириной $b = 2 \div 25$ мм и площадью поперечного сечения. Технологически важными характеристиками являются отношения $\frac{b}{H}$ и $\frac{b}{h}$. Вследствие значительного перегрева металл шва теряет марганец, углерод и кремний. Фосфор и сера в металле шва сохраняются полностью.

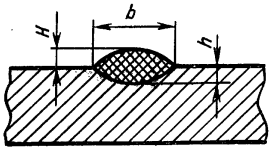


Рис. 2

Основными параметрами режима ручной дуговой сварки являются сила сварочного тока, напряжение дуги и скорость сварки. Тип электрода определяют в зависимости от химического состава свариваемого металла, согласно паспортным данным изготовителя электродов, руководствуясь каталогами на электроды. Диаметр электрода выбирают в зависимости от толщины свариваемого металла, положения шва в пространстве и размеров изделия. По принятому диаметру электрода и положению шва в пространстве подбирают сварочный ток.

Толщина металла, мм	1 — 2	3 — 5	4 — 10	12 — 24	30 — 60
Диаметр электрода, мм	2 — 3	3 — 4	4 — 5	5 — 6	6 — 8

Зависимость силы тока от диаметра электрода показана на рис. 3, где между штриховыми кривыми заключены допустимые отклонения силы тока. Сила тока увеличивается быстрее, чем диаметр электрода, и медленнее, чем площадь его сечения.

Для электродов диаметром 3—6 мм сила сварочного тока

$$I = (20 + 6d)\, d,$$

где d — диаметр электрода, мм.

Сварку швов в вертикальном и потолочном положениях выполняют, как правило, электродами диаметром не более 4 мм. При этом сила тока должна быть на 10—20% ниже, чем для сварки в нижнем положении.

На рис. 4 показаны траектории движения конца электрода: *а* — при наплавке усиленного валика; *б*, *в* и *г* — при выполнении углового шва с усиленным прогревом соответственно его краев, одного края и середины шва.

Для получения валика постоянной ширины необходимо, чтобы в процессе сварки поперечные колебания электрода и скорость его перемещения вдоль шва не менялись, при этом амплитуда поперечных колебаний не должна превышать 2—4 *d* электрода.

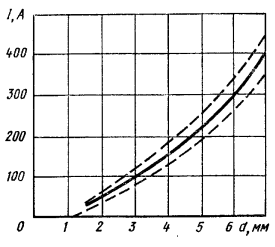


Рис. 3

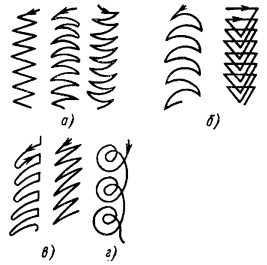


Рис. 4

Увеличение диаметра электрода ограничено возможностью возникновения прожогов свариваемого изделия, затруднением сварки швов в вертикальном и потолочном положениях, а также возникновением непровара при наложении первого слоя, который в многослойном шве обычно выполняют электродами диаметром 4—5 мм.

При укладке первого слоя многослойного шва электрод ведут без поперечных колебаний.

Дефекты сварных соединений (ГОСТ 19232—73). *Непровар* — дефект в виде местного несплавления в сварном соединении вследствие

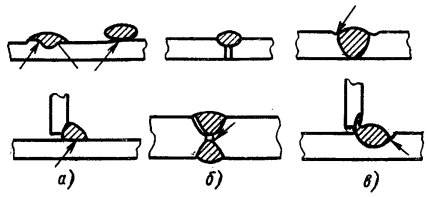


Рис. 5

неполного расплавления кромок или поверхностей ранее выполненных валиков. На рис. 5 показаны примеры непровара по кромке (*а*) и по сечению (*б*, *в*). Причинами непровара могут быть неправильное ведение процесса сварки, загрязнение поверхности металла, недостаточный ток и др.

Подрез зоны сплавления — дефект в виде углубления на основном металле вдоль линии сплавления сварного шва с основным металлом. На рис. 5, *в* показаны подрезы в зоне сплавления в стыковых и угловых швах.

Трещина сварного соединения — дефект в виде разрыва в сварном шве и прилегающих к нему зонах. Различают трещины сварного соединения продольные

(ориентированные параллельно продольной оси сварного шва); поперечные (ориентированные перпендикулярно продольной оси сварного шва); разветвленные (имеющие ответвления в различных направлениях); микротрещины (обнаруживаемые при увеличении не менее 50×); сетку трещин.

Трещины являются наиболее опасными видами дефектов сварных соединений, которые могут привести к разрушению конструкций при нормальных или пониженных нагрузках.

Склонность сварных швов к образованию трещин зависит от химического состава металла шва, жесткости конструкций, режима сварки, последовательности наложения швов и т. п.

Поры сварного шва — дефект в виде полости округлой формы, заполненной газом. Поры могут быть поверхностными, внутренними или располагаться в линию (цепочка пор сварного шва). Поры в сварном шве обычно имеют сферическую форму. Газовые пузыри образуются в результате перенасыщения жидкого металла газами, которые не успевают выйти на поверхность шва во время его кристаллизации.

Неметаллические включения сварного шва — дефект в виде неметаллической частицы в металле шва. Неметаллические включения в сварном шве — макро- и микроскопические частицы соединений металла с кислородом (оксиды), азотом (нитриды), серой (сульфиды,) фосфором (фосфиды). Различают эндогенные включения, т. е. такие включения, которые образуются в результате протекания в металле процессов (например, химических реакций), и экзогенные включения в результате попадания инородных частиц. В сварном шве могут иметь место включения: шлаковые, окисные и металлические (дефект в виде частиц инородного металла в металле шва).

К дефектам сварных швов также относятся брызги металла (дефект в виде затвердевших капель металла на поверхности сварного соединения), поверхностное окисление сварного соединения (дефект в виде окалины, пленки окислов или цветов побежалости), наплав на сварном соединении (дефект в виде натекания металла шва на поверхность основного металла или ранее выполненного валика без сплавления с ним), превышение усиления, занижение размеров сечения и неплавное сопряжение сварного шва, превышение проплава, смещение сварных кромок.

Основные типы сварных соединений. К основным типам сварных соединений относятся (табл. 1) стыковые, тавровые, угловые, внахлестку и прорезные. Тип шва определяется формой поперечного сечения подготовки кромок свариваемых изделий.

Форма поперечного сечения подготовленных кромок и выполненного шва установлена ГОСТ 5264—69 и 11534—75. Форма разделки кромок определяется толщиной свариваемого металла и положением шва в пространстве.

Скошенные кромки притупляют, чтобы предотвратить сквозное проплавление (прожоги) корня шва. Для лучшего провара между свариваемыми кромками оставляют зазор. Форма разделки кромок должна обеспечить возможность свободного манипулирования электродом при сварке при возможно меньшем объеме шва. Зазоры и размеры разделки кромок должны быть неизменными по всей длине соединения в пределах допусков.

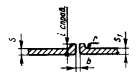
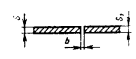
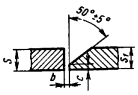
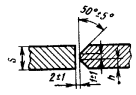
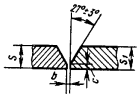
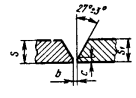
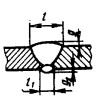
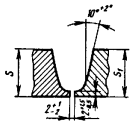
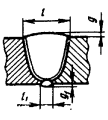
При больших толщинах, начиная с 12 мм, применяются двусторонние скосы кромок или криволинейные скосы одной или двух кромок. Преимущество двустороннего или криволинейного скоса кромок заключается в меньшем по сравнению с односторонним скосом объеме наплавленного металла, расходе сварных электродов; снижении деформаций, сопутствующих сварке.

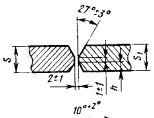
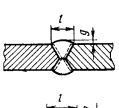
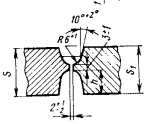
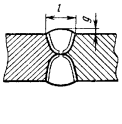
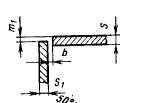
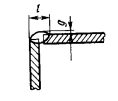
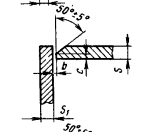
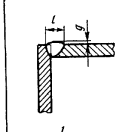
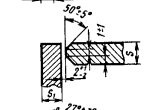
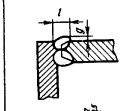
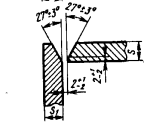
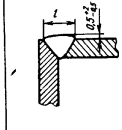
Соединения внахлестку, втавр и прорезные выполняют угловыми (валиковыми) швами. Соединения внахлестку можно выполнять электрозаклепками.

Различают также швы непрерывные (сплошные) и прерывистые. Прерывистыми швами и электрозаклепками сваривают соединения, не требующие герметичности.

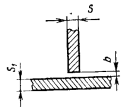
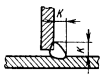
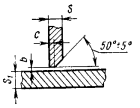
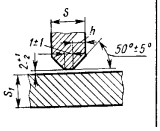
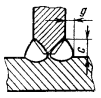
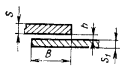
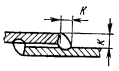
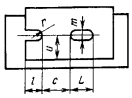
1. Виды и характеристики сварных соединений

Продолжение табл. 1

Форма подготовленных кромок	Характер выполненного шва	Форма поперечного сечения: подготовленных кромок	Форма поперечного сечения: выполненного шва	Пределы толщин свариваемых деталей, мм
Стыковые соединения				
С отбортовкой двух кромок	Односторонний			1—3
Без скоса кромок	Односторонний			1—6
Со скосом одной кромки	Односторонний			4—26
С двумя симметричными скосами одной кромки	Двусторонний			12—60
Со скосом двух кромок	Односторонний			8—50
Со скосом двух кромок	Двусторонний			3—50
С криволинейным скосом двух кромок	Двусторонний			15—100

Форма подготовленных кромок	Характер выполненного шва	Форма поперечного сечения: подготовленных кромок	Форма поперечного сечения: выполненного шва	Пределы толщин свариваемых деталей, мм
С двумя симметричными скосами кромок	Двусторонний			12—60
С двумя симметричными криволинейными скосами кромок	Двусторонний			30—100
Угловые соединения				
Без скоса кромок	Односторонний			1—6
Со скосом одной кромки	Односторонний			4—26
С двумя скосами одной кромки	Двусторонний			12—60
Со скосом двух кромок	Односторонний			12—50

Продолжение табл. 1

Форма подготовленных кромок	Характер выполненного шва	Форма поперечного сечения: подготовленных кромок	Форма поперечного сечения: выполненного шва	Пределы толщин свариваемых деталей, мм
Тавровые соединения				
Без скоса кромок	Односторонний			2—30
Со скосом одной кромки	Двусторонний			4—20
С двумя скосами одной кромки	Двусторонний			12—60
Соединения внахлестку				
Без скоса кромок	Двусторонний			2—60
С удлиненным отверстием	Односторонний с несплошной заваркой			

Примечание. Конструктивные элементы подготовленных кромок свариваемых деталей, их размеры и размеры выполненных швов приведены в ГОСТ 5264—69.

Швы бывают усиленными (выпуклыми), без усиления и ослабления (вогнутые).

Подготовку кромок под сварку можно производить газовыми резаками (вручную, полуавтоматом, автоматом), на кромкострогальном или кромкофрезерном станке, на токарном станке, пневматическими зубилами. После газовой резки кромки не должны иметь надрезов, выплавленных углублений и зазубрин.

При сварке встык листов неодинаковой толщины наибольшую предельную разность толщин ($S_1 - S$) выбирают в зависимости от толщины тонкого листа (S), руководствуясь табл. 2 ГОСТ 5264—69.

Толщина тонкого листа S, мм	до 3	4 — 8	9 — 11	12 — 25	Св. 25
Наибольшая разность толщин $S_1 - S$, мм	0,7	0,6	0,4	5	7

Подготовку кромок под сварку производят так же, как для листов одинаковой толщины, конструктивные элементы подготовленных кромок и размеры выполненного шва сварного соединения выбирают по большей толщине S_1, руководствуясь примечанием к табл. 1 ГОСТ 5264—69.

При разности толщин листов, свариваемых встык, превышающей указанные пределы, на листе, имеющем большую толщину, должен быть сделан скос с одной или двух сторон листа длиной $L = 5(S_1 - S)$ при одностороннем превышении кромок и $2{,}5(S_1 - S)$ при двустороннем превышении кромок до толщин тонкого листа S, как указано на рис. 6.

Допускаются следующие смещения свариваемых кромок относительно друг друга (мм, не более):

0,5 — для толщин не более 4 мм;

1,0 — для толщин 4—10 мм;

0,1 S (но не более 3 мм) — для толщин не менее 10 мм.

Для потолочных и горизонтальных швов в вертикальной плоскости допускается угол разделки кромок, равный $22 \pm 3°$, и зазор, равный 4 ± 1 мм.

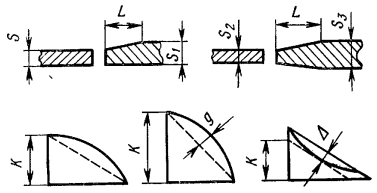


Рис. 6

За катет K принимают меньший катет неравнобедренного треугольника (рис. 6).

Усиление шва (g) допускается не более 2 мм для швов, выполненных в нижнем положении, и не более 3 мм для швов, выполненных во всех пространственных положениях.

Ослабление шва сварного соединения (Δ) при сварке во всех пространственных положениях допускается не более 3 мм.

При двусторонней сварке допускается удалять ранее наложенный корень шва до чистого металла любым способом.

Допускается увеличение предельных отклонений усиления шва, выполняемого в вертикальном, горизонтальном и потолочном положениях, на 1 мм для $S \leqslant 26$ мм и на 2 мм для $S \geqslant 26$ мм.

Форма подготовки кромок, размеры поперечного сечения шва регламентированы ГОСТ 5264—69. В нем предусмотрены 25 видов стыковых соединений, 10 угловых, 11 тавровых и три вида соединений внахлестку; соответственно им присвоены обозначения С, У, Т и Н. Всем видам соединений присвоены порядковые номера, т. е. от С1 до С25, У1 до У10, Т1 до Т11 и Н1 до Н3. ГОСТ 11534—75 регламентирует восемь угловых и восемь тавровых соединений.

Особенности выполнения сварных швов различных типов. *Влияние магнитных полей на сварочную дугу.* Столб сварочной дуги можно рассматривать как гибкий проводник, по которому проходит электрический ток. Собственное магнитное поле дуги и поле сварочного контура (ферромагнитных масс) вызывает явление, известное под названием «магнитного дутья».

На магнитное дутье влияют такие факторы, как место подвода тока к изделию, толщина свариваемого металла, конфигурация изделия и пр. Под влиянием магнитных полей сварочная дуга может перемещаться и изменять свою форму.

Магнитное дутье может затруднять сварку дугой постоянного тока, особенно при повышении его значения, так как сила воздействия магнитного поля прибли-

зительно пропорциональна квадрату тока. Продольное магнитное поле улучшает технологические свойства дуги; под действием поперечного магнитного поля сварочная дуга отклоняется.

На рис. 7, *а* — *в* показаны схемы отклонений сварочной дуги под влиянием магнитного поля в зависимости от положения обратного сварочного провода на свариваемом металле. На рис. 7, *а* сварочный провод находится непосредственно под дугой. В этом случае дуга находится в равномерном магнитном поле, которое ее уравновешивает; отклонений дуги не будет.

На рис. 7, *б* сварочный провод присоединен слева от дуги. Магнитные поля, сконцентрированные внутри угла, образованного электродом и токоподводящей

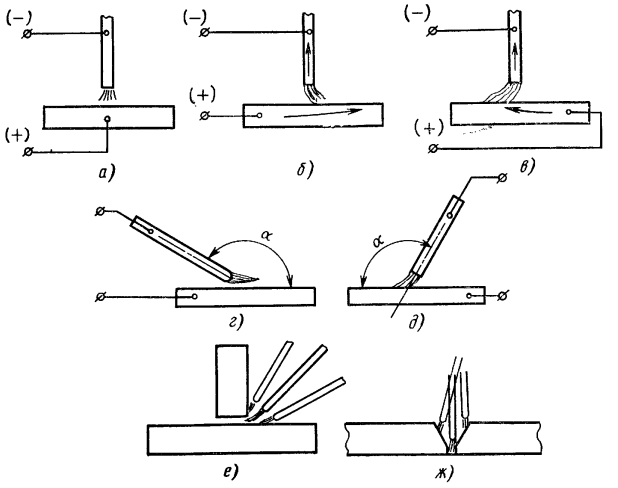


Рис. 7

частью металла, будут отклонять дугу вправо, и, наоборот, — если переместить токопровод вправо от дуги, то магнитное поле будет отклонять дугу влево (рис. 7, *в*).

Угол наклона электрода к поверхности свариваемого металла также влияет на величину отклонения столба дуги. Чем больше угол наклона, тем сильнее дуга выдувается в сторону, противоположную наклону электрода (рис. 7, *г* и *д*). Как видно из рисунка, изменением угла наклона электрода можно регулировать величину отклонения дуги под влиянием магнитного дутья. Наличие вблизи дуги значительных ферромагнитных масс (массивных стальных деталей) оказывает влияние на отклонение дуги.

С явлением магнитного дутья сварщик сталкивается при сварке угловых (рис. 7, *е*) и стыковых (рис. 7, *ж*) швов, когда дуга отклоняется на одну из кромок и затрудняет сварку.

При сварке на переменном токе магнитное дутье влияет на дугу значительно слабее. Магнитный поток, создаваемый в сварочном контуре переменным током, индуктирует в массе основного металла токи Фуко (вихревые токи), которые порождают переменное поле, сдвинутое почти на 180° по отношению к сварочному

току. Результирующий магнитный поток, равный геометрической сумме магнитных потоков сварочного и вихревых токов, значительно меньше магнитного потока при постоянном токе; кроме того, он сдвинут по фазе относительно сварочного тока, что ослабляет электромагнитную силу взаимодействия магнитного поля с током.

Для ослабления нежелательного действия магнитного дутья при сварке рекомендуется применять следующие меры: наклонять электрод; изменять место подключения сварочного провода к изделию; применять переменный ток и т. п.

Влияние размеров сварочной ванны на процессы сварки. Способность ванны деформироваться А. А. Ерохин называет текучестью ванны, которая зависит от запаса теплоты (энтальпии), условий охлаждения вытекающего металла и размеров ванны, так как энтальпия металла в разных зонах ее неодинакова. Наиболее нагретым (а потому наиболее подвижным) является металл головной части ванны, в хвостовой же ее части температура металла снижается и вязкость его нарастает. Вблизи стенок ванны, даже в головной ее части, имеется слой металла, находящийся в твердо-жидком состоянии. Чем больше размер ванны, тем больше ее текучесть.

Отношение F_1/F_2 (где F_1 — площадь наплавленного металла, а F_2 — площадь ванны) может служить характеристикой текучести ванны и является критерием для каждого типа электродов, определяющим их пригодность для сварки в вертикальном и потолочном положениях.

Текучесть сварочной ванны является важным фактором, определяющим формирование шва.

Сопоставляя электроды различных марок по массе ванны (G) при одном и том же режиме сварки, можно подразделить их на три группы: с малым значением G (например, ВИАМ-25), со средним значением G (например, УОНИ-13) и электроды с большим значением G (например, ОЗС-3). Такое подразделение электродов соответствует их разбивке по технологическим свойствам: электроды с наименьшей массой ванны, электроды промежуточного типа и электроды с наибольшей массой ванны. Электроды с наименьшей массой ванны (их иногда называют «холодными» электродами) позволяют вести сварку в любом пространственном положении; электроды промежуточного типа позволяют вести сварку во всех пространственных положениях. Электроды с наибольшей массой ванны (их иногда называют «горячими» электродами), не пригодны для сварки в потолочном, вертикальном и наклонном положениях. Таким образом, масса ванны является основным показателем, характеризующим возможность применения сварки в том или ином пространственном положении. В пределах одного процесса масса ванны может значительно изменяться за счет режима сварки.

Изменение массы ванны при одном и том же режиме сварки (при одной силе тока и скорости сварки) для различных типов электродов объясняется разными коэффициентами расплавления α_p и напряжением дуги.

Массу, которая является предельно допустимой, обеспечивающую сварку в данных технологических условиях, например в потолочном положении, А. А. Ерохин называет критической массой. Установлено, что критическая масса ванны зависит от ее положения в пространстве, от толщины свариваемого металла и глубины проплавления.

Режим сварки, очевидно, надо выбирать исходя из того чтобы при всех условиях (в данном пространственном положении) масса ванны была меньше критической.

Нагрев и охлаждение металла ванны и отчасти свариваемого металла можно просто и достаточно эффективно регулировать с помощью колебательного движения электрода (см. рис. 4). Колебания электрода (поперечные, продольные или комбинированные) позволяют в известных пределах рассредоточить тепловой поток в ванне, охлаждая металл при отводе электрода с того или иного участка ванны и тем самым устраняя течение металла в нежелательном направлении. Колебательные движения электрода уменьшают опасность появления прожогов, возможность стекания металла при наклонном положении сварочной ванны,

а также выпуклость шва со стороны дуги, что облегчает сварку последующих слоев. Сварку в потолочном положении следует выполнять электродами диаметром предпочтительно 4 мм, а сварку в вертикальном положении — электродами диаметром, не превышающим 5 мм, имеющими коэффициент наплавки не выше 10 г/А·ч, исходя из того, что с увеличением диаметра электрода увеличивается объем сварочной ванны, вследствие чего ухудшаются условия ее удержания. Чаще для вертикальной сварки используют электроды диаметром 4 мм.

При сварке высоколегированными электродами сила сварочного тока должна быть на 10—15% ниже, чем при сварке низколегированными электродами. Это обусловлено более высоким омическим сопротивлением высоколегированной проволоки.

Сварка стыковых швов в нижнем положении. Электрод наклоняют вперед по направлению его перемещения под углом 15—30° к вертикали. Такое его положение обеспечивает равномерное покрытие жидкого металла сварочного валика слоем расплавленного сварочного шлака и предотвращает затекание шлака на нерасплавленный свариваемый металл перед дугой.

Особенности сварки стыковых швов и подготовки кромок определяются толщиной основного металла.

При сварке стыковых швов необходимо обращать особое внимание на равномерность расплавления обеих кромок для чего концу электрода сообщается поперечное колебательное движение.

Основной трудностью сварки стыкового соединения является правильное проплавление корня шва с обратной его стороны.

При недостаточном токе стыковое соединение не проплавляется на всю толщину, в результате чего получается непровар.

При чрезмерном токе получается сквозное проплавление металла, и расплавленный металл вытекает из корня шва, образуя с обратной стороны натек.

При ручной сварке стыковых соединений практически трудно получить стабильное проплавление корня шва по всей его длине. Такие соединения иногда выполняют с предварительной подваркой корня шва с обратной стороны. Если обратная сторона шва недоступна, применяют подкладки, что дает возможность проварить все сечение шва с одной стороны.

Подкладка — деталь или приспособление, устанавливаемые под кромки свариваемых частей для формирования или защиты от окисления обратной стороны сварного шва или предотвращения протекания металла сварочной ванны.

Сварка с подкладками имеет ряд преимуществ, работа ведется с одной стороны шва; производительность сварки значительно возрастает, так как сварщик, не опасаясь прожогов и натеков, работает на допустимых повышенных режимах.

Для этой цели можно рекомендовать медно-флюсовые подкладки (медная подкладка с канавкой, заполненной флюсом), керамические, стальные (в этом случае подкладку приваривают) и др., например покрытие подкладки асбестовым картоном.

При выполнении сварочных работ дугу следует возбуждать только на металле, расплавленном при сварке, или на заваренном шве. В начале шва следует несколько уменьшить скорость сварки, в конце шва кратер должен быть заполнен металлом; конец шва не следует выводить на основной металл. Особое внимание должно быть обращено на зачистку кромок перед сваркой.

Для определения числа слоев при стыковой и угловой сварке достаточно удовлетворительно можно пользоваться данными табл 2. При многослойной сварке швы накладываются короткими участками длиной 200—300 мм. Корень шва должен быть тщательно проварен. При сварке последующих слоев каждый валик накладывается несколько уширенным.

Перед наложением каждого валика поверхность предыдущего должна быть тщательно очищена от шлака, брызг и окалины.

Сварка угловых швов. При сварке соединений втавр внахлестку и в угол кромки углового шва несимметричны в отношении отвода тепла.

Например, при сварке таврового соединения одна из кромок, с которой стыкуется под углом другая кромка, отводит тепло примерно в 2 раза интенсивнее и поэтому плавится значительно медленнее. При сварке углового шва электрод ведут в средней плоскости угла раскрытия и для равномерного расплавления металла обеих кромок сообщают концу электрода поперечные колебательные движения. При катете шва менее 8 мм шов выполняется за один проход без колебания электрода с поперечным наклоном его на 40—50° к горизонту и на 10—20° в направлении сварки.

Техника выполнения углового шва определяется величиной его поперечного сечения. Угловые швы сечением >8 мм, как правило, рекомендуется выполнять в несколько слоев (см. табл. 2).

Угловые швы удобно сваривать при положении «в лодочку» (рис. 8).

Сварка в различных пространственных положениях. При дуговой сварке расплавляемый металл вытесняется из передней части сварочной ванны в ее хвостовую часть (рис. 9).

От характера переноса электродного материала зависит устойчивость процесса сварки, формирование сварного шва, стабильность качества сварного соединения, величина потерь электродного металла и т. п.

При сварке в вертикальном положении металл сварочной ванны стремится под действием силы тяжести стечь вниз. Для удержания жидкого металла в ванне вертикальные швы выполняют короткой дугой при минимальной силе тока. Для сварки вертикальных швов применяют электроды предпочтительно диаметром 3—4 мм. Сварочный ток, например, для электродов диаметром 4 мм устанавливают не более 160 А. Сварку вертикальных швов возможно вести двумя способами: снизу вверх и сверху вниз.

2. Число слоев при сварке

Стыковая сварка		Угловая сварка	
Толщина металла, мм	Число слоев, не считая подварки	Катет шва, мм	Число слоев
2	1	2	1
4	1	6	1
6	1—2	8	1
8	2—3	10	1
10	2—3	12	3
12	3—4	14	3—4
14	3—5	16	4—5
16	4—6	18	5—6
18	5—6	20	5—6
20	5—7	22	6—7

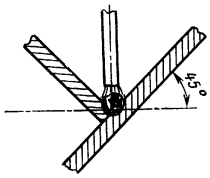


Рис. 8

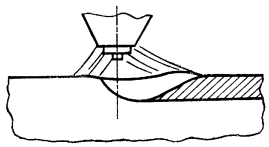


Рис. 9

Вертикальные швы выполняют при сварке металла толщиной до 3 мм сверху вниз, при более толстом металле — снизу вверх.

При сварке вертикального шва сверху вниз применяют электроды с небольшим коэффициентом расплавления $\alpha_р$, дуга возбуждается в верхней точке шва. Зажигание дуги производят при вертикальном положении электрода по отношению к шву (положение *1*, рис. 10, *б*), затем в момент образования кратера сварку ведут при наклонном положении электрода короткой дугой (положение *2*). Скорость сварки выбирают с таким расчетом, чтобы жидкий металл не затекал под дугу. При сварке сверху вниз (рис. 10, *б*) ее ведут без поперечных колебаний электрода. При сварке

вертикального шва снизу вверх (рис. 10, *а*) дуга возбуждается в нижней точке шва. Электрод рекомендуется вести с наклоном вверх под углом 45—50° к горизонту. Во время сварки концу электрода сообщают поперечное колебание для получения уширенного валика и обеспечения лучшего провара свариваемых кромок.

Потолочная сварка. Сварку в потолочном положении возможно вести только очень короткой дугой, при этом конец электрода периодически то приближают, то отводят от сварочной ванны. Потолочную сварку ведут электродами диаметром предпочтительно 3—4 мм, сварочный ток выбирают по нижнему пределу, с тем чтобы ванна расплавленного металла была минимальных размеров. При сварке в потолочном положении амплитуда поперечных колебаний электрода уменьшена, в результате чего получается более узкий шов. Потолочные сварочные работы должен выполнять сварщик высокой квалификации. Поэтому в заводских условиях стараются по возможности избегать потолочной сварки, что достигается установкой свариваемых изделий на различного вида манипуляторах.

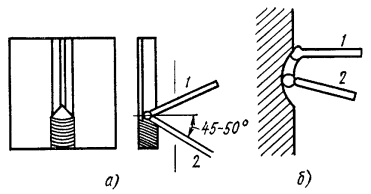


Рис. 10

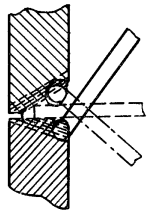


Рис. 11

Сварка встык горизонтальных швов на вертикальной поверхности при односторонней К-образной подготовке кромок показана на рис. 11. Нижнюю кромку делают без стыка.

Сборка и сварка металлоконструкций. Точность заготовок и качество сборки отдельных узлов и изделия должны обеспечить требуемые размеры конструкции, постоянство зазоров по всей длине швов (в пределах допусков и смещения кромок в плоскости свариваемых элементов конструкции изделия сверх установленных ГОСТ 5264—69).

Различают приспособления сборочные, сварочные и комбинированные, т. е. сборочно-сварочные.

Необходимость и целесообразность совмещения сборки и сварки в одном приспособлении решается на основе учета технологических конструктивных и экономических соображений:

возможности наложения всех швов на изделие при наличии элементов сборочного приспособления;

возможности сохранения правильного взаимного положения отдельных деталей после снятия собранного и прихваченного узла со сборочного приспособления;

целесообразности усложнения конструкции приспособления.

При мелкосерийном производстве применяются сборочно-сварочные кондукторы, имеющие поворотный стол для установки изделия в положение «в лодочку». При крупносерийном или массовом производстве выгоднее расчленять операции сборки и сварки, так как это дает возможность полнее использовать оборудование, повысить производительность труда сборщиков и сварщиков.

Назначение сборочно-сварочных приспособлений и механизмов:

облегчение трудоемких операций по установке и фиксированию деталей при сборке;

исключение разметки перед сборкой, в результате чего упрощается сборка;

уменьшение времени поворота изделия в процессе сварки для установки свариваемых изделий в удобное для сварки положение;

обеспечение взаимозаменяемости сварных узлов;

возможность использования менее квалифицированной рабочей силы в результате упрощения процессов сборки и сварки;

упрощение контрольно-приемочных операций при наличии выверенной и периодически контролируемой оснастки.

Термины и определения сборочных, сварочных и комбинированных приспособлений (ГОСТ 2601—74):

сварочный позиционер — устройство для закрепления и поворота заготовок в удобное для сварки пространственное положение;

сварочный манипулятор — устройство карусельного типа для вращения заготовок при сборке и сварке с различными углами наклона оси вращения;

сварочный вращатель — устройство для вращения вокруг постоянной оси свариваемых частей со скоростью сварки;

роликовый вращатель — сварочный вращатель, в котором вращение объекта сварки обеспечивается приводными роликами;

сварочный кондуктор — приспособление для сборки и закрепления относительно друг друга свариваемых частей в определенном положении.

Стандарты на механическое и сварочное оборудование:

ГОСТ 19140—73 — вращатели сварочные горизонтальные двухстоечные (вращатели со сварочной скоростью, обеспечивающие вращение свариваемого изделия вокруг горизонтальной оси при автоматической сварке; вращатели с маршевой скоростью, обеспечивающие поворот свариваемого изделия вокруг горизонтальной оси в положение, удобное для сварки);

ГОСТ 19141—73 — вращатели сварочные вертикальные (вращатели со сварочной скоростью, обеспечивающие вращение свариваемого изделия вокруг вертикальной оси при автоматической сварке; вращатели с маршевой скоростью, обеспечивающие поворот свариваемого изделия вокруг вертикальной оси в положение, удобное для сварки);

ГОСТ 19142—73 — кантователи сварочные двухстоечные с подъемными центрами;

ГОСТ 19143—73 — манипуляторы сварочные (манипуляторы со сварочной скоростью, обеспечивающие наклон и вращение свариваемого изделия при автоматической сварке; манипуляторы с маршевой скоростью, обеспечивающие наклон и поворот свариваемого изделия в положение, удобное для сварки).

На рис. 12—15 показаны схемы соответственно: манипуляторов; кантователей (пяти типов); кондуктора; позиционера. Освоен серийный выпуск манипуляторов мод. М11020, М-0,12, М11030, М11050, Т-25М, М-1, М-2, М11070, УСМ-5000; вращателей горизонтальных мод. М31030, М31050, М3-070; вращателей вертикальных мод. М21030, М21050, М21070; кантователей двухстоечных мод. КД-1. Чертежи на указанное оборудование разработаны Всесоюзным проектно-конструкторским институтом сварочного производства. Технические характеристики сварочных манипуляторов приведены в табл. 3.

Основные рабочие инструменты сварщика: электрододержатель, стальная щетка зубило, специальный молоток.

Для защиты лица и глаз сварщика от воздействия мощного невидимого ультрафиолетового излучения столба дуги, ослепляющих световых лучей и инфракрасных лучей, брызг и расплавленного металла служат специальные щитки и маски.

Основные параметры электрододер жателей (ГОСТ 14651—69) при продолжительности цикла 5 мин и отношении продолжительности рабочего периода к продолжительности цикла 60% следующие:

Номинальная сила тока, А	125	315	500
Масса кг, не более	0,35	0,50	0,70

Электрододержатели должны обеспечивать возможность применения электродов по ГОСТ 9466—75:

Номинальная сила тока, А	125	315	500
Диаметр электродов, мм	1—3	3—6	6—4

Конструкция электрододержателей должна допускать возможность надежного прижима электрода не менее чем в двух положениях: перпендикулярно и под углом не менее 115° к оси электрододержателя.

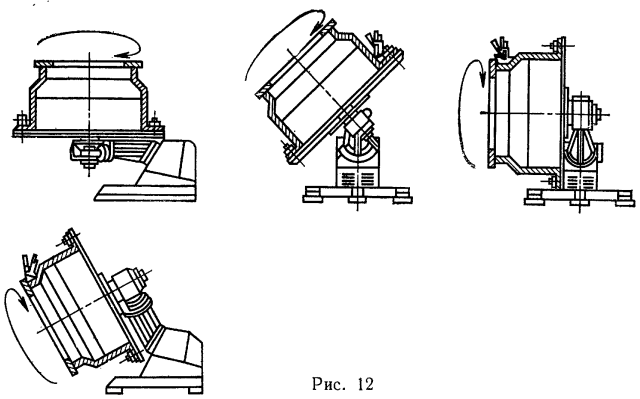


Рис. 12

ГОСТ 14651 —69 предусматривает надежность изоляции токоведущей части, размеры рукоятки, ее изоляцию, надежность присоединения сварочного провода. Электрододержатель должен выдержать 8000 зажимов. Также предусматриваются методы испытания электрододержателей на предприятиях-изготовителях.

Основные параметры щитков и масок регламентированы ГОСТ 1361—69. При высоте 300 мм, ширине 220 мм и глубине 150 мм масса щитка (без стекол) не более 0,48 кг, а масса маски не более 0,5 кг. Корпуса щитков и масок должны быть изготовлены из нетокопроводящего, нетоксичного и невоспламеняющегося материала, стойкого к брызгам расплавленного металла, и не должны быть ломкими и хрупкими. Щитки и маски должны быть укомплектованы светофильтрами марок Э-1, Э 2, Э-3 или Э-4 по ГОСТ 9497—60, по заказу потребителя — покровным стеклом по ГОСТ 111—65 для защиты светофильтра от брызг металла и защитным стеклом из оргстекла.

Технические требования также предусматривают размеры рамки для светофильтров, стекол и их расположение, их конструкцию, размеры ручки щитков, приспособлений для масок и т. п.

Пути повышения производительности труда. Производительность ручной дуговой сварки может быть повышена путем применения электродов с повышенным

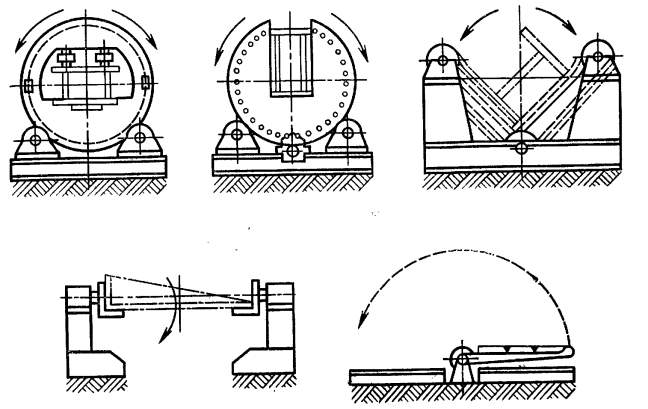


Рис. 13

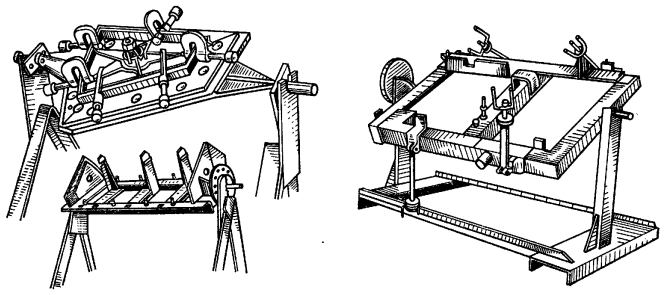


Рис. 14

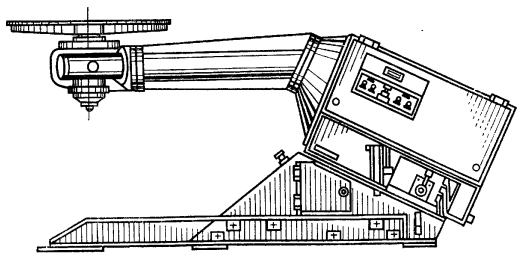


Рис. 15

3. Технические характеристики сварочных манипуляторов

Наименование показателей	Показатели по моделям манипуляторов									
	М11020	М-0,12	М11030	М11050	Т-25М	М-1	М-2	М11070	УСМ-5000
Момент на оси вращения планшайбы, кгс · м, не более	6,3	16		100	400	250	600	630	350
Грузоподъемность, кг, не более	63	120	125	500	1000		2000		5000
Размеры свариваемых узлов, мм: длина		1200	—	1500	900	1400	2000	1800	3500
ширина		1200		1500	900	1000	1200	1000	1500
высота		900		900	1000	1200	1000	2000	—
Диаметр свариваемых круговых швов, мм	125—630	80—800	160—800	250—1250	250—900	300—1700	500—2000	До 2000	200—2500
Допускаемый момент центра тяжести изделия относительно опорной поверхности, кгс · м	10	25		160	—	400	700	1000	
Угол наклона планшайбы, градусы	135	—	135		90	135			
Частота вращения планшайбы, об/мин: рабочая	0,1—5	0,1—2,5	0,08—4	0,05—2,5	—	0,04—1,01	0,0357—0,892	0,032—1,6	0,0264—0,956
маршевая	—	4	—	—					
Скорость подъема планшайбы, м/мин	—								0,16
Сила сварочного тока, А	1000	800	До 1000	1000	—				

коэффициентом наплавки; электродов больших диаметров (8—10 мм); спаренных электродов; специальных способов дуговой сварки (погруженной дугой, ванным способом). Значительный эффект достигается за счет применения полуавтоматической сварки лежачим и наклонным электродами.

Сварка электродами с повышенным коэффициентом наплавки. Для электродов большинства марок коэффициент наплавки имеет значение 7,2—10,0 г/А·ч. Электроды с повышенным коэффициентом наплавки (> 10,0 г/А·ч) имеют в составе покрытия значительное количество железного порошка, переходящего частично в шов вместе с расплавляемым металлом электрода. К таким электродам относятся: АНО-5 (11,0 г/А·ч); ЭРС-1 (14,0 г/А·ч); ОЗС-3 (15,0 г/А·ч). Электроды этих марок пригодны для сварки только в нижнем положении.

Сварка электродами больших диаметров. Применение электродов больших диаметров (8,0—10,0 мм) позволяет вести сварку при увеличенном токе и тем самым повысить производительность сварки. При сварке такими электродами увеличивается масса электрода и электрододержателя, что вызывает быстрое утомление сварщика; появляются трудности с обеспечением должного провара корня шва в узких разделках кромок и угловых швов. С увеличением сварочного тока значительно увеличивается влияние на процесс сварки «магнитного дутья», особенно при сварке на постоянном токе.

Сварка спаренными электродами, пучком электродов. Этот способ сварки заключается в одновременной работе двумя (спаренными) электродами, тремя (и более) изолированными друг от друга электродами. Электроды соединяют в пучок путем наложения прихватки в месте зажима их в электрододержатель. Ток подводится одновременно ко всем электродам. Дуга горит между изделием и тем электродом, который находится в данный момент ближе к изделию.

Экономические преимущества сварки пучком электродов по сравнению со сваркой одинарным электродом сечением, равным сечению одного электрода в пучке, в том, что производительность сварки увеличивается примерно на 30% за счет повышения сварочного тока, уменьшения вспомогательного времени на смену электродов и лучшего использования тепла дуги.

К недостаткам сварки пучком электродов следует отнести практическую непригодность этого метода при вертикальной и потолочной сварке, а также сложность изготовления таких электродов.

Сварка погружной дугой (с глубоким проваром) с опиранием электрода или сварка ультракороткой дугой. При этом способе сварки используют электроды с покрытием, способствующим увеличению глубины провара, и специальные режимы сварки. Для этого вида сварки используют электрод с увеличенным (80—100%) коэффициентом массы покрытия (отношение массы покрытия к массе покрытой части стержня).

Электрод (рис. 16) опирают образующимся при плавлении козырьком на свариваемый металл *1* (позиция *3* — шлак) с наклоном под углом 70—85° к горизонту для лучшего вытеснения жидкого металла из кратера. Сварка производится на максимально допустимых токах с повышенной скоростью. Повышение производительности при этом методе сварки получается за счет уменьшения количества наплавленного металла *2*, приходящегося на единицу длины шва за счет увеличения доли расплавленного металла изделия в шве.

Сварка погруженной дугой требует тщательной подготовки свариваемого изделия: поверхность вдоль шва должна быть очищена от ржавчины; зазор между кромками не должен превышать 10% толщины металла изделия.

Ванная дуговая сварка плавящимся электродом характеризуется увеличенными размерами сварочной ванны, удерживаемой в специальной форме (стальная или из керамики). Стальную форму приваривают к сварному стыку, керамические формы делают разъемными и после сварки удаляют.

Способ применяют при сварке стержневых изделий (например, железобетонной арматуры и рельсов). Сварку можно вести одним или несколькими электродами. Для ванной сварки пригодны электроды марок УОНИ. Сварку ведут на повышенных режимах, что обеспечивает необходимый нагрев свариваемых элементов для создания большой ванны из жидкого металла (рис. 17, где: *1* — скоба; *2* — свариваемые стержни; *3* — шов).

Сварку начинают в нижней части формы, в зазоре между торцами стержней. Электрод вначале передвигают вдоль зазора. В процессе сварки наплавляемый металл должен находиться в жидком состоянии.

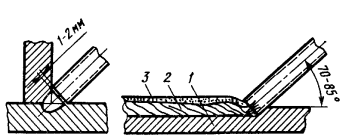


Рис. 16

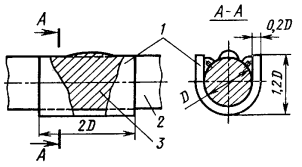


Рис. 17

Полуавтоматическая сварка штучными металлическими плавящимися электродами с толстым покрытием. *Сварка лежачим электродом* — дуговая сварка, при которой неподвижный плавящийся электрод укладывают вдоль свариваемых кромок, а дуга перемещается по мере расплавления электрода. Тавровое соединение сваривается в положении «в лодочку». При сварке встык и «в лодочку» электрод прижимается тяжелым медным бруском к изделию. Брус имеет продольную канавку для помещения под ним электрода.

Схемы сварки лежачим электродом показаны на рис. 18 (*1* — электрод; *2* — свариваемое изделие; *3* — свариваемая кромка) и рис. 19 (*1* — массивный

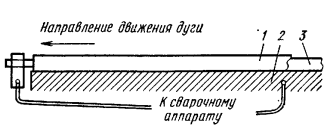


Рис. 18

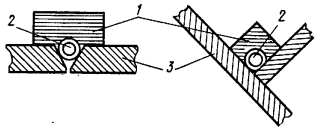


Рис. 19

медный брус; *2* — покрытие; *3* — свариваемое изделие).

Дуга возбуждается между торцом электрода и свариваемым изделием в результате замыкания угольным или металлическим стержнем у конца электрода. После возбуждения дуга перемещается под брусом по длине электрода, постепенно расплавляя электрод и основной металл и образуя валик. Сварка лежачим электродом особенно удобна в труднодоступных местах. При этом способе сварки длина покрытой части электрода принимается равной длине шва. Длина электрода может быть в пределах до 1200 мм, диаметр — до 8 мм. Толщина электродного покрытия несколько больше, чем при обычной электродуговой сварке плавящимся электродом. Сечение шва получается примерно равным сечению электрода. Режимы сварки лежачим электродом угловых и стыковых швов приведены в табл. 4 а стыковых швов — в табл. 5.

4. Режимы сварки угловых швов лежачим электродом

Режим	Катет, мм				
	6,0—6,5	6,5—7,0	8	8,5—10,0	12
Диаметр электрода, мм . . .	5	6	7	8	10
Сила тока, А	200—240	260—300	340—380	380—450	450—500

5. Режимы сварки стыковых швов лежачим электродом

Толщина листов, мм	Разделка кромок	Число слоев	Диаметр электрода, мм	Сила тока, А
5	Без скоса	2	5	200—240
6,5			6	260—300
8	V-образный угол разделки 70°		8	340—380
10			8	340—380
12			8—10	360—400
14		3	6	300—360

Сварка лежачим электродом обеспечивает высокое качество металла шва; повышает производительность по сравнению с обычной ручной сваркой в 1,5—2 раза благодаря возможности применения электродов большего диаметра при соответственном увеличении силы тока; уменьшает потери металла на угар и разбрызгивание. Кроме того, при сварке лежачим электродом сварщик (оператор) может обслуживать несколько постов.

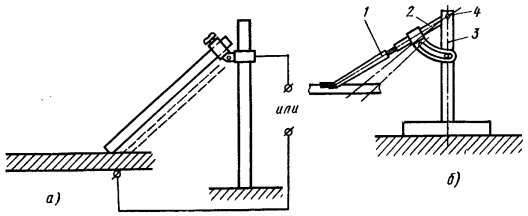


Рис. 20

Недостатками этого способа сварки являются невозможность регулирования сечения валика при данном диаметре электрода; недостаточная глубина провара корня шва; трудность осуществления сварки криволинейных швов и сварки по прихваткам.

Сварка наклонным электродом — дуговая сварка, при которой плавящийся электрод расположен наклонно вдоль свариваемой кромки и по мере расплавления движется под действием силы тяжести или пружины.

Сварка наклонным электродом известна в двух разновидностях: с постоянным углом наклона, не меняющимся в процессе сварки (рис. 20, *а*); с меняющимся углом наклона (рис. 20, *б*).

В первом случае (рис. 20, *а*) сварку ведут наклонным электродом с толстым покрытием под постоянным углом 30—45° к изделию. Нижний конец электрода с выступающим краем толстого покрытия опирается на свариваемое изделие, а верхний конец его закрепляется в электрододержателе, скользящем по направляющей обойме. Дуга возбуждается замыканием конца электрода на изделие. При плавлении электрода на его конце образуется козырек из обмазки, препятствующий короткому замыканию между электродом и изделием. По мере расплавления и опускания электрода образуется валик. Сечение шва регулируется изменением угла наклона электрода.

Во втором случае (рис. 20, *б*) зажим электрода *1* установлен на стержне *2*, скрепленном со стойкой *3* шарниром *4* и свободно поворачивающимся около оси шарнира. Стержень *2* удерживается от поворота электродом, конец которого упирается в изделие.

После зажигания дуги электрод плавится и укорачивается, стержень *2* постепенно поворачивается вместе с электродом. Конец электрода и дуга перемещаются вдоль разделки кромок (или вдоль угла таврового соединения), образуя валик. Угол наклона электрода к поверхности изделия не остается постоянным и постепенно увеличивается в процессе сварки.

Способы сварки лежачим и наклонным электродами дают наплавленный металл высокого качества. При наклонном электроде сила сварочного тока примерно та же, что и при ручной сварке плавящимся электродом.

СВАРКА ПОД ФЛЮСОМ

Общие сведения. Сварку, как правило, ведут в нижнем положении на режимах, приведенных в табл. 6. Свариваются все конструкционные материалы толщиной от 1 мм и выше, используемые при изготовлении разнообразных, в том числе и особо ответственных конструкций и механизмов. Основное применение находит автоматическая сварка. Полуавтоматический вариант используется в ограниченном объеме.

6. Режимы сварки под флюсом

Группа	Диаметр проволоки, мм	Сила тока, А
I	< 1,4	100—250
II	1,4—2	240—500
III	2,5—3	480—700
IV	4—5	600—1300
V	6—8	> 1200

Широкое промышленное применение находят режимы IV группы, в которых в наибольшей степени реализуются все преимущества автоматической сварки. При сварке используют преимущественно стационарную дугу прямого действия. Электрический разряд возникает между основным металлом, подсоединенным к одному из полюсов источника тока, и плавящимся в процессе сварки металлическим электродом, подсоединенным к другому полюсу этого источника. Металл плавящегося электрода участвует в формировании шва. Иногда используют дугу косвенного действия. Электрический разряд в этом случае возникает между двумя электродами, подсоединенными к полюсам источника питания. Свариваемые детали в электрическую цепь не включены. Возможна сварка нестационарной (импульсной) и прерывистой (вибрирующей) дугой, а также магнитное управление переносом электродного металла и формированием сварочной ванны.

В зависимости от поставленной технологической задачи при сварке дугой прямого действия применяют одну, две (и более) электродные проволоки или стержни другого типа. При сварке одной проволокой ее можно располагать вертикально или с наклоном, поперек или вдоль свариваемых кромок, углом вперед или назад. При всех вариантах для изменения конфигурации шва проволоке можно придать поперечные, продольные или комбинированные перемещения (колебания) по отношению к свариваемым кромкам. Амплитуда и частота перемещений могут быть различными.

Режимы сварки одной проволокой

Диаметр электрода, мм	1—6
Вылет электрода, мм	12—80
Сила тока, А	100—2000
Напряжение, В	18—55
Скорость сварки, м/ч	5—105
Плотность тока в электроде, А/мм²	30—150
Количество наплавленного металла, кг/ч	1—20
Коэффициент наплавки, г/А·ч	14—20

За счет увеличения вылета электродов коэффициент наплавки можно увеличить на 40—50%. Это не всегда рационально, так как нарушается оптимальное соотношение между расплавленными основным и присадочным металлами и возникают трудности формирований большого количества жидкого металла.

При сварке двумя проволоками и более последние располагаются вертикально, наклонно или комбинированно по отношению к свариваемым кромкам

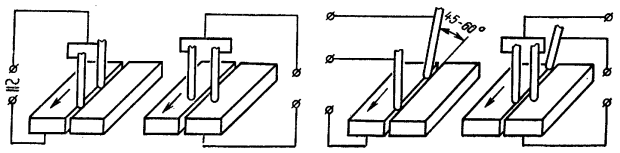


Рис. 21

и параллельно или последовательно друг к другу (рис. 21). Если все проволоки подсоединены к одному полюсу источника питания, процесс называют многоэлектродным (двухэлектродным); при подсоединении каждой из проволок к отдельному источнику питания — многодуговым (двухдуговым). Для питания дуг применяют источники постоянного или переменного тока или осуществляют комбинированное питание. Возможно питание по трехфазной схеме. Всем или некоторым из проволок могут быть приданы колебания вдоль или поперек свариваемых кромок. Сварку можно вести в общую ванну, когда весь расплавленный

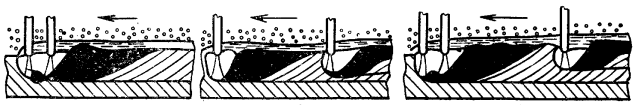


Рис. 22

металл образует единый объем (рис. 22, *а*), или в раздельные ванны, когда каждая дуга образует свою обособленную ванну (рис. 22, *б*). Последующая дуга в этом случае частично или полностью переплавляет слой, сваренный предшествующей дугой. Возможна комбинация этих вариантов (рис. 22, *в*). Стрелкой на рис. 22 показано направление сварки. Сварку можно вести двумя, тремя (и более) проволоками в каждую ванну. При сварке в раздельные ванны минимальное расстояние определяется длиной ванны, образованной первой проволокой, а максимальное — длиной участка, на котором шлак, полученный при плавлении флюса первой дугой, находится в жидком состоянии.

Сварку в общую ванну ведут по многоэлектродной или многодуговой схеме, сварку в раздельную ванну — только по многодуговой схеме.

Режимы сварки несколькими проволоками

Диаметр электрода, мм	2—6
Количество электродов	2—4
Вылет электрода, мм	15—80
Сила тока (суммарного), А	400—4600
Напряжение, В	18—60
Скорость сварки, м/ч	12—220

При сварке угловых швов в общую ванну скорость составляет не более 100 м/ч. Критическая скорость $v_{кр}$ для однослойных двусторонних стыковых швов при сварке лежит в пределах, указанных на рис. 23, *а* — одной проволокой *1*; *б* — двумя *2* и тремя *3* проволоками.

За счет применения расщепленного электрода или ленты, сварки с колебаниями электрода, специальных флюсов, подогрева свариваемых деталей в зоне сварки до 200—300° С скорость однодуговой сварки может быть выше критической еще на 30—40%. Дальнейшее повышение линейной скорости перемещения источника теплоты ограничивается неблагоприятной конфигурацией проплавления, проявляющейся в образовании швов с малым коэффициентом формы. При этом снижается стойкость металла шва против кристаллизационных трещин и наблюдается образование сначала подрезов, а затем специфических дефектов, получивших название зоны несплавления. Природа их возникновения еще не достаточно ясна. Вероятно это явление связано с плохим растеканием расплава.

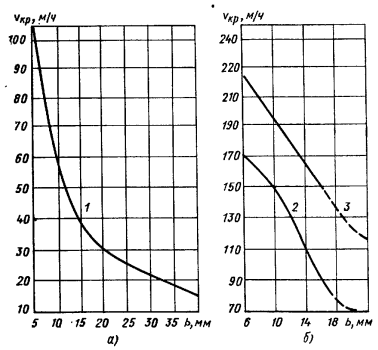


Рис. 23

При сварке двумя (и более) проволоками за счет возрастания линейной скорости перемещения дуги (при однослойной сварке) и увеличения количества вводимого в сварочную ванну за единицу времени присадочного металла (при многослойной сварке) обеспечивается существенное повышение производительности.

При сварке несколькими дугами в раздельные ванны за счет предварительного и сопутствующего подогрева и возможности создания благоприятного для данных условий термического цикла достигается также повышение качества сварного соединения. Применение проволок различного химического состава позволяет в нужных пределах изменять состав металла шва. Несмотря на весьма значительное повышение производительности при сварке несколькими проволоками стыковых однослойных швов при толщине металла до 20 мм, вопрос о целесообразности применения этого процесса должен решаться для каждого конкретного случая. Следует указать, что применение его рационально в большинстве случаев при массовом поточном производстве, где обеспечен высокий коэффициент использования установки. Нерациональность применения многодуговой сварки в ряде случаев обусловлена необходимостью установки длинных выводных планок (из-за большой длины сварочной ванны), значительными капитальными затратами на оборудование и отчислениями на его амортизацию, большей вероятностью образования дефектов и, как следствие, увеличенными затратами на контроль качества и устранение этих дефектов. При сварке длинных продольных и параллельно расположенных круговых швов применяют обслужи-

ваемые одним рабочим многоголовочные установки. Каждая из головок может вести сварку одним, двумя (и более) электродами. Для повышения количества вводимого в сварочную ванну за единицу времени присадочного металла в зону дуги или на основной металл в процессе сварки или заблаговременно подают холодную или подогретую проволоку, стержни мерной длины, окатыши, железный порошок, гранулированные присадки и металл в любом другом, пригодном для данной цели виде.

При введении в сварочную ванну специальных гранулированных присадок, оказывающих модифицирующее действие на металл шва, достигается также и повышение его качества.

Для некоторых специальных целей (например, при сварке алюминия) используют разновидность сварки с флюсовой защитой, именуемой сваркой по флюсу. В этом случае применяют тонкий дозированный слой флюса, не полностью закрывающий зону дуги.

Схема процесса и его сущность. Основное промышленное применение находит сварка под флюсом одной расположенной вертикально электродной проволокой сплошного сечения. Схема процесса для этого варианта приведена на рис. 24. Нагрев и плавление основного и присадочного металла достигается за счет тепловой энергии, получаемой при преобразовании подводимой к дуге электрической энергии. Дуга *1* возникает между электродной проволокой *2* и основным металлом *3*, подсоединенными к полюсам источника питания. В качестве такого источника используют специальные однофазные или трехфазные сварочные трансформаторы переменного тока с пологопадающей внешней характеристикой, генераторы и выпрямители постоянного тока с пологопадающей или падающей внешней характеристикой. При сварке на постоянном токе процесс преимущественно ведется при обратной (минус на изделии) полярности. Возможна сварка при прямой полярности.

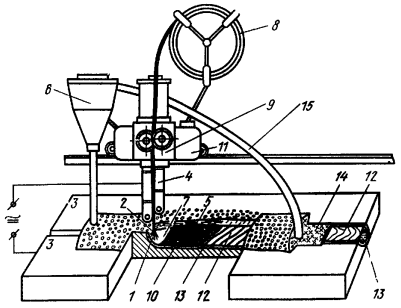


Рис. 24

Подвод тока к электродной проволоке и ориентация конца ее по отношению к свариваемым кромкам достигаются при помощи мундштука *4*. Подвод тока к изделию обеспечивают неподвижные или подвижные контактные устройства (струбцины, щетки и пр.). Режим существования дуги при сварке под флюсом определяется силой тока, напряжением и длиной дуги. Температура столба дуги достигает 5000—6000 К.

В процессе сварки электрод и расплавленный основной металл со всех сторон окружены слоем *5* флюса, насыпаемым на основной металл из флюсоаппарата *6*, работающего обычно от заводской сети сжатого воздуха. Высоту и ширину слоя устанавливают исходя из условия обеспечения эффективной изоляции зоны сварки от окружающего воздуха и создания плотного формирующего жидкий металл барьера. Обычно высота слоя лежит в пределах 20—60 мм. При нагреве и плавлении флюс выделяет газы и пары, способствующие стабилизации дугового разряда.

Дуга находится в заполненном парами и газами пузыре, сводом которого является прослойка *7* из жидкого шлака. Количество шлака составляет 30—40%

от массы сварочной ванны. Газы, пары и шлак образуются при плавлении металлов и флюса и в результате взаимодействия фаз, участвующих в формировании шва. Наличие пузыря обеспечивает физическую изоляцию зоны дуги от контакта с воздухом, но не устраняет возможность попадания азота, кислорода и водорода из других источников.

При сварке под флюсом в зоне дуги могут присутствовать H_2; N_2; O_2, CO, CO_2 и другие газы. Водород попадает в зону дуги, а из нее в сварочную ванну из основного и присадочного металлов, из гидратированных разлагающихся в процессе сварки оксидных пленок, имеющихся на поверхности этих металлов, из влаги, адсорбированной на поверхности зерен флюса. Вероятность попадания влаги в зону дуги возрастает с увеличением влажности воздуха, резким изменением его температуры и увеличением гигроскопичности флюса. Водород является основным возбудителем пор при сварке стали под флюсом. Для снижения вероятности образования пор необходимо тщательно прокаливать флюс непосредственно перед употреблением и применять электродную проволоку с чистой поверхностью. Основной металл до сборки должен быть очищен от ржавчины, рыхлого слоя окалины, влаги, масла и других загрязнений. Азот попадает в зону дуги из металлов, участвующих в процессе, и в том числе из металла прихваток, выполненных электродами со стабилизирующим покрытием, или вследствие физического нарушения защиты. По содержанию азота в металле шва можно судить об эффективности защиты; она при сварке под стекловидными флюсами весьма высока. Содержание азота в металле шва при нормальном протекании процесса не превышает 0,002%. При сварке под пемзовидными флюсами содержание азота в металле шва несколько повышается. Повышение содержания азота наблюдается и при сварке по кромкам, подготовленным плазменной резкой.

Кислород попадает в сварочную ванну за счет последовательной диссоциации паров воды и взаимодействия шлака и расплава при раскислении последнего. Водород, азот и кислород в газовой фазе присутствуют в молекулярном виде. В сварочной ванне водород физически растворяется в жидком металле в виде атомов (ионов), а азот и кислород в основном вступают с металлом в химическое взаимодействие.

Столб и ореол дуги при сварке под флюсом невидимы для глаз. Поэтому процесс часто называют сваркой невидимой дугой. Защита рабочих от излучений при сварке под флюсом не нужна. Контроль за ходом сварки ведут по приборам и указателю положения электрода. Отсутствие возможности визуального наблюдения за взаиморасположением конца электрода и свариваемых кромок повышает требования к точности сборки. Возникает необходимость в создании специальных систем слежения. Наличие защитного и формующего слоев флюса позволило существенно повысить мощность дуги, обеспечить отсутствие брызг и хорошее формирование сварочной ванны большого сечения, резко увеличить производительность процесса, улучшить и стабилизировать качество сварного соединения, снизить расход присадочного металла и электроэнергии и повысить съем продукции с полезной площади цеха. Значительное повышение производительности обусловлено возросшим проплавляющим эффектом дуги и увеличением количества вводимого в сварочную ванну за единицу времени присадочного металла. Как видно из схемы процесса, при автоматической сварке под флюсом электродная проволока по мере ее плавления из бухты *8* подается в зону дуги сварочной головкой *9*, которая обеспечивает возбуждение дуги, установление и поддержание напряжения и тока, обрыв дуги и прекращение процесса по окончанию шва. При полуавтоматической сварке (рис. 25) электродная проволока по мере ее плавления подается также из бухты расположенным на некотором расстоянии от места сварки подающим механизмом *А* через гибкий шланг *Б* и держатель *В*, находящийся в руке сварщика, в зону дуги. Подающий механизм обеспечивает подачу электродной проволоки по мере ее плавления в зону дуги. Возбуждение дуги, установление и поддержание заданного напряжения дуги и прекращение сварки осуществляются рукой человека. Сварочная головка и подающий механизм работают в большинстве случаев по принципу саморегулирования. При этом методе скорость подачи электродной проволоки устанавливается заранее и в процессе сварки не изменяется. Она равна скорости плавления электрода. При случайном уменьшении или увеличении дугового промежутка соответственно изменяется сила тока. Проволока начинает плавиться быстрее или медленнее, и дуговой промежуток приобретает первоначальную длину.

Находят применение сварочные головки и подающие механизмы, работающие в режиме принудительного регулирования. В этом случае скорость подачи проволоки изменяется в процессе сварки по определенному закону в зависимости от колебаний тока, напряжения или другого параметра.

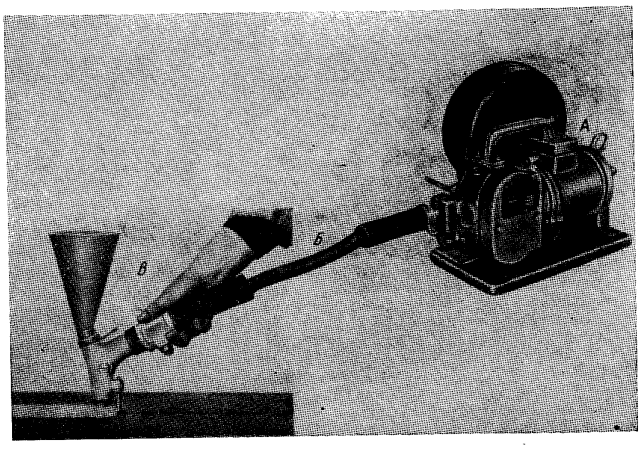


Рис. 25

Плавление электродной проволоки при сварке под флюсом происходит за счет тепловой энергии дуги и нагрева ее на участке вылета проходящим током. Средняя линейная скорость плавления электрода зависит от его состава, вылета, силы и плотности тока, рода тока и других причин.

При плавлении проволоки на ее торце накапливается некоторый объем жидкого металла. Этот металл в результате взаимодействия электромагнитных сил, реактивного давления паров, сил поверхностного натяжения и тяжести в виде отдельных капель (или струи) и паров переносится через дуговой промежуток на основной металл. Размер и частота переноса капель определяются режимом сварки. В ряде случаев перенос капель происходит в потоке шлака без непосредственного контакта с атмосферой столба дуги. При сварке на большой силе тока, когда дуговой промежуток мал, наблюдается «смывание» жидкого металла с конца электрода подвижным расплавом сварочной ванны, что исключает возможность образования на торце электрода капли большого размера.

При сварке под флюсом практически весь электродный металл участвует в образовании шва. Потери на угар и разбрызгивание не превышают 1—3%. Попадая на основной металл, жидкий металл электрода самопроизвольно, без участия внешних сил, соединяется с жидким металлом, образующимся при рас-

плавлении свариваемых кромок. Формируется единая сварочная ванна *10* (см. рис. 24). Конвективные потоки, действующие в ванне, способствуют хорошему перемешиванию основного и наплавленного металла и образованию однородного расплава. Средняя температура его ~1800° С. Ванна имеет в плане эллипсовидное очертание. Глубина и ширина ванны плавно изменяются по ее длине. Длина ванны зависит от силы тока I и напряжения V и может быть с достаточной для практических целей точностью рассчитана по зависимости

$$L_в = pIV,$$

где p — коэффициент пропорциональности, зависящий от мощности процесса.

Объем ванны в зависимости от режима сварки изменяется в пределах 0,3—30 см³. В сварочной ванне различают две части — головную и хвостовую. В головной — высокотемпературной части ванны размещается дуга. Здесь плавятся флюс, электрод и кромки основного металла и происходит смешивание этих металлов. Форма головной части сварочной ванны определяется формой фронта плавления. В хвостовой — низкотемпературной части окончательно формируется сварочная ванна и происходит ее охлаждение и затвердевание. Форма хвостовой части сварочной ванны диктуется формой фронта кристаллизации.

Формирование сварочной ванны можно схематически представить в таком виде. Образовавшийся в головной части сварочной ванны объем жидкого металла под воздействием на ее зеркало механических и других сил перемещается в хвостовую часть. В головной части остается канавка (углубление). Ее дно покрыто жидкой прослойкой, а на боковых стенках силами поверхностного натяжения удерживается тонкая пленка расплавленного металла. Канавка по ходу сварки заполняется расплавом, поступающим из головной части, который сливается с жидкой прослойкой и пленкой. При слиянии происходит сближение атомов до расстояния, при котором появляются атомно-молекулярные связи между расположенными на пограничных поверхностях элементарными частицами. Происходит собственно сварка.

По мере формирования сварочной ванны дуга, а вместе с ней и температурное поле перемещаются вдоль подлежащих сварке кромок с заданной скоростью. Перемещение дуги при автоматической сварке осуществляется при помощи тележки *11* (см. рис. 24) или устройства, передвигающегося по специальным расположенным вне сварочного изделия путям; трактора для дуговой сварки, перемещающегося по свариваемому изделию или передвижения изделия.

Линейная скорость перемещения дуги при выполнении шва постоянна или изменяется по определенной зависимости. При полуавтоматической сварке перемещение дуги вдоль соединяемых кромок осуществляется рукой рабочего или простейшим приводимым в движение от руки приспособлением. По мере удаления источника нагрева отвод теплоты от сварочной ванны в основной металл и атмосферу приводит к снижению температуры расплава и его затвердеванию.

Формирование кристаллитов начинается от частично оплавленных зерен основного металла или кристаллитов ранее застывшего участка шва, образующих границу ванны. Кристаллиты растут в направлении теплоотвода нормально к поверхности затвердевания. Скорость кристаллизации изменяется от нуля на границе сплавления до скорости перемещения дуги на оси шва в хвостовой части ванны. Образовавшийся в результате кристаллизации шов *12* имеет литую столбчатую (дендритную) структуру. Он соединяет в единое монолитное целое ранее разобщенные детали. Ширина шва соответствует ширине сварочной ванны в самом широком месте. Глубина проплавления равна глубине канавки. Рядом со швом располагается зона *13* термического влияния. Здесь, как при всех видах сварки плавлением, наблюдается изменение свойств основного металла по сравнению с исходным состоянием. Поверхность шва покрыта шлаковой коркой *14*, удаляемой после остывания металла. Иногда, особенно при сварке первого слоя в узкую разделку, наблюдается плохая отделимость шлаковой корки. На образование корки расходуется до 25% флюса, составляющего защитный слой. Неиспользованный флюс через шланг *15* возвращается в флюсоаппарат и может быть

использован повторно. При сварке под флюсом, как и при других дуговых процессах, выделяется некоторое количество вредных газов и аэрозолей.

Строение сварного соединения. Процесс сварки под флюсом завершается формированием неразъемных стыковых, тавровых, нахлесточных, бортовых, угловых и других соединений. Они образуются с помощью угловых и стыковых швов. Сварное соединение должно отвечать комплексу требований, обеспе-

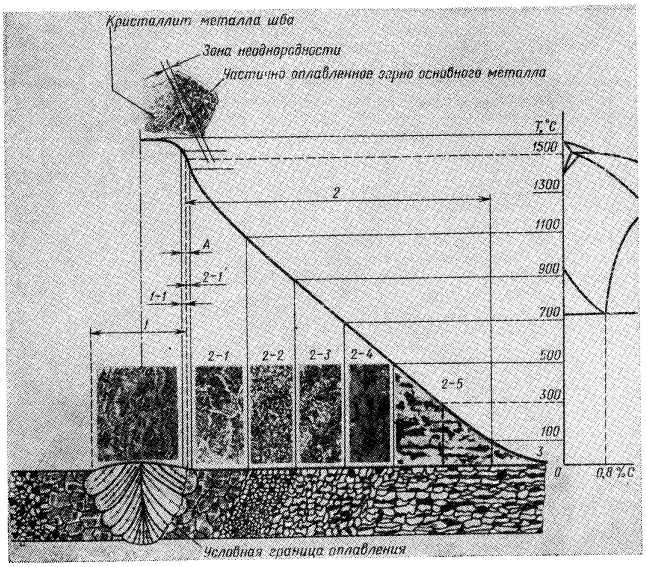


Рис. 26

чивающих работоспособность данной конструкции в условиях эксплуатации. Эти требования устанавливают индивидуально.

Схема стыкового сварного соединения с односторонним однослойным швом в состоянии после сварки показана на рис. 26. Строение соединения с однослойным угловым швом принципиально не отличается от приведенной схемы.

Металл шва простирается до условной границы сплавления, определяющей положение воображаемой поверхности раздела между основным, подвергшимся термодеформационным воздействиям металлом и металлом шва. Шов имеет литую структуру. Механические свойства, конфигурация и размеры шва зависят от состава и свойств основного металла и сварочных материалов, от режима сварки и конструкции соединения. Механические свойства металла шва определяются его структурой, зависящей от химического состава и скорости остывания металла, характера и величины пластической деформации, претерпеваемой им в процессе формирования сварного соединения.

Химический состав металла шва зависит от доли участия основного и присадочного металла и от взаимодействия расплава с газовой и шлаковой фазами. Желаемого состава металла шва достигают путем введения в сварочную ванну полезных компонентов из основного и электродного металла и флюса и уменьшения содержания в ней загрязнений за счет снижения их в основном металле сварочной проволоки и флюсе и металлургической обработки жидкого металла в процессе сварки. Ход металлургических процессов, протекающих при сварке под флюсом, оказывает существенное влияние на качество сварного соединения.

При сварке стали под флюсами типа АН-348-А или ОСЦ-45 в высокотемпературной части сварочной ванны протекают восстановительно-окислительные эндотермические реакции. В результате этих реакций в жидком металле идет накопление марганца, кремния и закиси железа и уменьшается содержание углерода. Интенсивность протекания реакции определяется режимом сварки и составом и характером флюса. В низкотемпературной части марганец и кремний, находящиеся в расплаве, действуют как раскислители и в виде окислов переходят в шлак. Однако, так как длительность взаимодействия металла и шлака при сварке под флюсом невелика (от 10 с до 1 мин), равновесия системы металл — шлак не достигается, и содержание марганца и кремния в металле сварочной ванны (а следовательно, и в шве) сохраняется выше исходного количества, определяемого содержанием их в основном и присадочном металлах и долями их участия. Влияние электролиза на состав расплава при сварке под флюсом не имеет практического значения. О коэффициенте усвоения, определяющем переход данного элемента из шлака в сварочную ванну (+) или из сварочной ванны в шлак (—), можно судить по экспериментальным данным, приведенным в табл. 7.

7. Коэффициенты усвоения для флюса АН-348-А*[1] при сварке низкоуглеродистых конструкционных сталей низкоуглеродистыми сварочными проволоками

Коэффициент усвоения, %			
Δ Mn	Δ Si	Δ C	Δ P
+0,18÷+0,23	+0,13÷+0,20	−0,028÷−0,035	+0,008÷+0,011
Средние значения			
+0,20	+0,15	−0,031	−0,009

*[1] Для других флюсов коэффициент также определяют опытным путем.

При стандартном плавленом флюсе достигается лишь незначительное легирование марганцем и кремнием, небольшой угар углерода и переход в ванну фосфора. Более значительное и многокомпонентное легирование обеспечивается при применении агломерированных флюсов. Содержание элементов в металле шва с достаточной для многих практических целей точностью может быть определено расчетом из зависимости

$$[R_ш] = Y_{пр}[R_{пр}] + [1 - Y_{пр}][R_0] + \Delta R,$$

где $R_{пр}$ — аналитическое содержание элемента в присадочном металле, %; $Y_{пр}$ — доля участия присадочного металла в металле шва; R_0 — аналитическое содержание элемента в основном металла, %; ΔR — коэффициент усвоения.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что легирование металла шва при сварке под флюсом достигается за счет основного металла, проволоки и флюса, что шире возможностей, существующих при сварке в защитных газах. Общеизвестно, что при легировании сварочной ванны через флюс несколько увеличивается содержание в ней кислорода. Кроме того, наблюдается некоторая неоднородность распределения легирующих по сечению шва в результате колебаний режима сварки и затухания конвективных потоков в хвостовой части ванны, что ухудшает условия перемешивания расплава. Однако, как показал многолетний опыт эксплуатации большого числа весьма ответственных конструкций, изготовленных из низкоуглеродистой и низколегированной стали, химическая неоднородность металла шва, вызванная легированием его через флюс, не сказываются на их эксплуатационной стабильности. В сварочной ванне при сварке

под флюсом имеются неметаллические включения различного происхождения. Следует различать оксидные, нитридные, сульфидные и фосфоросоединяющие включения. Эти включения существенно влияют на ударную вязкость металла шва и на стойкость его против кристаллизационных трещин. Интенсивность влияния неметаллических включений на качество шва зависит от их формы, размеров и расположения.

В металле шва особо следует выделить расположенный вдоль границы сплавления микроучасток интенсивной диффузии (участок *1—1* на рис. 26), характеризующийся резкой химической неоднородностью, возникающей, с одной стороны, вследствие интенсивного протекания диффузионных процессов и, с другой стороны, в связи с плохим перемешиванием пограничного слоя с основной массой сварочной ванны. Наличие его не связано со спецификой процесса и типично для всех разновидностей дуговой сварки.

Изменение скорости остывания металла шва в интервале температур наименьшей устойчивости аустенита приводит при сварке низкоуглеродистой стали к изменению количества и строения перлитной фазы, и при сварке низко-

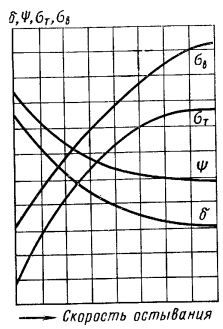


Рис. 27

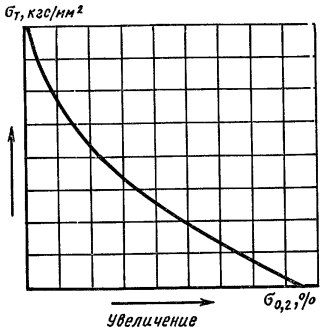


Рис. 28

легированной, низкоуглеродистой стали — к образованию, кроме перлита и феррита, также мартенсита, бейнита и остаточного аустенита. Увеличение скорости остывания до некоторых пределов вызывает повышение пределов текучести и временного сопротивления и снижение относительного сужения и удлинения (рис. 27).

При сварке среднелегированной стали и стали других марок наблюдаются те же закономерности. Скорость остывания металла шва определяется сечением шва, толщиной свариваемого металла и его начальной температурой. Изменение начальной температуры в пределах климатических температур (+60 ÷ −60° С) не оказывает практически заметного влияния на механические свойства шва при статических нагрузках. В результате существенного влияния, оказываемого скоростью остывания и пластической деформацией, а также легирования сварочной ванны компонентами, переходящими из проволоки и флюса, прочностные характеристики существенно превосходят аналогичные показатели низкоуглеродистого и низколегированного основного металла. О пределе текучести $\sigma_т$ металла угловых швов, сваренных под флюсами АН-348-А и ОСЦ-45 низкоуглеродистой сварочной проволокой, по сравнению с $\sigma_т$ основного металла, можно судить по рис. 28.

Для стали других групп сохраняются те же закономерности. Получение при сварке под флюсом швов, равнопрочных основному металлу при сварке низко-

углеродистой и низколегированной стали, не представляет особой трудности. Ударная вязкость металла шва в значительной степени определяется структурой участка, расположенного под надрезом образца, применяемого для испытания. Так как металл шва, особенно многослойного, неоднороден по самой своей природе, трудно сопоставлять данные, полученные в различных условиях. Обеспечение ударной вязкости металла шва, имеющего литую структуру на уровне свойств основного термически обработанного металла при отрицательных температурах, представляет технологически сложную задачу.

О значении критической температуры перехода металла швов, выполненных с применением стандартных сварочных материалов на низкоуглеродистой и низколегированной стали, в хрупкое состояние можно судить по данным табл. 8. При применении специальных флюсов и электродных проволок, марки которых назначают в зависимости от состава основного металла, критическая температура может быть понижена еще на 15—20° С.

8. Критическая температура*1, °С по видам швов

Тип шва	Механизированная сварка*2						Ручная дуговая сварка*3
	Низкоуглеродистая сталь (проволока) диаметром, мм			Низколегированная сталь (проволока) $\sigma_т \leqslant 40$ кгс/мм², диаметром, мм			Низкоуглеродистая и низколегированная сталь
	3—5	1,4—2	1—1,2	3—5	1,4—2	1,0—1,2	
Однослойные односторонние стыковые швы с обратным валиком	—30	—35	—	—35	—40	—	—
Однослойные угловые швы и второй шов при двусторонней одиослойной сварке	—35	—40	—	—40	—45	—	—
Последний слой многослойного шва, сваренный после остывания предыдущего слоя до комнатной температуры			—50			—50	—55
Середина многослойных угловых и стыковых швов	—40	—50	—60	—45	—50	—60	—65

*1 За критическую принята температура, при которой ударная вязкость образцов с полукруглым надрезом равна 3 кгс · м/см².
*2 Флюсы АН-348А и ОСЦ-45, проволоки Св-08 и Св-08ГА. При сварке в углекислом газе проволока Св-08Г2С.
*3 Электроды марки УОНИ-13/45 и УОНИ-13/55 диаметром 3—5 мм.

Из приведенных в табл. 8 данных видно, что металл швов, выполненных стандартными сварочными материалами, в состоянии после сварки имеет более низкую критическую температуру, чем низкоуглеродистая горячекатаная и термически обработанная сталь, находится на уровне горячекатаной низколегированной стали и уступает термически обработанной низколегированной стали. Критическая температура металла шва может быть существенно понижена за счет соответствующей термической обработки. Для сравнения в табл. 8 приведены данные по сварке в углекислом газе и покрытыми электродами.

Формы и размеры шва оказывают существенное влияние на прочность и работоспособность сварного соединения и в значительной степени предопределяют стойкость его против трещин и пор, вероятность образования непроваров, подрезов, наплывов и других дефектов формирования, плавность перехода к основному металлу, расход сварочных материалов и электроэнергии и производительность процесса. Форма и размеры шва характеризуются рядом параметров, определяющих конфигурацию внешней и внутренней его частей. Для сварки под флюсом типичны плавный переход от металла шва к основному металлу, вогнутая форма поверхности углового шва и гладкая или мелкочешуйчатая фактура поверхности швов всех типов. Форма и размеры шва устанавливаются уже на стадии ванны и зависят от величины и направления действующих на нее сил.

Размеры шва и его конфигурация определяются типом шва и режимом его выполнения и назначаются в зависимости от конкретной задачи.

К основным элементам режима при сварке под флюсом относятся величина, род и полярность тока, диаметр электрода, напряжение дуги и скорость ее перемещения. На формирование шва оказывают влияние вылет электрода и его положение в пространстве (вертикальное, наклонное), характер и частота поперечных перемещений конца электрода и расположение шва. О характере влияния основных параметров режима на размеры и форму шва можно судить по данным, приведенным в табл. 9. Изменение начальной температуры основного металла в пределах, наблюдаемых в естественных условиях (+60 ÷ —60° С), не оказывает практического влияния на конфигурацию шва. При сварке на прямой полярности и сохранении той же силы тока глубина проплавления практически не изменяется, а количество расплавляемого электродного металла увеличивается на 25—35%. Это приводит к увеличению доли наплавленного металла в металле шва. При сварке на прямой полярности, при сохранении той же скорости подачи электродной проволоки, что и при сварке на обратной полярности, за счет снижения силы тока существенно уменьшается глубина проплавления, а количество расплавляемого электродного металла остается неизменным. В результате также повышается доля наплавленного металла в металле шва.

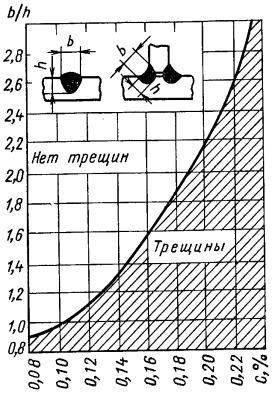


Рис. 29

При дуговой сварке под флюсом характер источника теплоты предопределяет возможность получения швов с очертанием проплавления, приближающимся к полуэллипсу, с коэффициентом формы 0,5—0,7. Такая форма проплавления не может быть реализована из-за снижения стойкости металла шва против кристаллизационных трещин, возрастания вероятности образования непровара из-за отсутствия достаточно надежных методов направления конца электрода по месту сварки, повышения критической температуры перехода металла шва в хрупкое состояние и неблагоприятного очертания усиления. Сейчас широко используют режимы, при которых обеспечивается форма проплавления, приближающаяся к полуокружности, с коэффициентом формы провара от 1,3 до 3,0. Такие швы обладают повышенной стойкостью против кристаллизационных трещин, не требуют особо точного направления электрода по месту сварки, характеризуются достаточно плавным переходом от металла шва к основному металлу и имеют более низкую критическую температуру перехода металла шва в хрупкое состояние, чем узкие швы.

О стойкости металла шва с различным коэффициентом формы шва b/h против кристаллизационных трещин можно судить по данным, показанным на рис. 29, где видно, что увеличение коэффициента формы шва приводит (до определенных пределов) к монотонному увеличению критического содержания углерода в металле шва (при содержании не более 0,50% Si, 0,045% Mn и $Mr/S \geqslant 18$).

9. Влияние элементов режима сварки на размеры, форму и состав шва при сварке на пе

Параметр	Изменение параметра при увеличении											
	Сила тока	Диаметр электрода	Напряжение дуги, В		Скорость сварки,		м/ч	Поперечное перемещение и увеличение ширины электрода	Наклон электрода		Направление сварки		Вылет	
			24—34	35—46	До 15	15—40	Св. 40		углом вперед	углом назад	на спуск	на подъем	при равной силе тока	при равной подаче
Глубина проплавления	Интенсивно увеличивается	Уменьшается	Незначительно увеличивается	Незначительно уменьшается	Несколько увеличивается	Практически не изменяется		Уменьшается		Увеличивается	Уменьшается	Увеличивается	Не изменяется	Уменьшается
Ширина шва	Незначительно увеличивается	Увеличивается		Интенсивно увеличивается	Уменьшает		ся	Увеличивается		Уменьшается	Увеличивается	Уменьшается	Не изменяется	
Высота усиления	Интенсивно увеличивается	Уменьшается			Незначительно увеличивается		чивается	Уменьшается		Увеличивается	Уменьшается	Увеличивается	Интенсивно увеличивается	Не изменяется
Коэффициент формы проплавления	Интенсивно уменьшается	Увеличивается	Интенсивно увеличивается		Незначительно уменьшается		шается	Интенсивно увеличивается	Увеличивается	Уменьшается	Увеличивается	Уменьшается	Не изменяется	Увеличивается
Коэффициент формы усиления		Увеличивается			Уменьшает		ся						Уменьшается	Не изменяется
Доля основного металла в металле шва (для однослойных швов)	Интенсивно увеличивается	Уменьшается	Незначительно увеличивается		Интенсивно увеличивается		вается	Уменьшается		Увеличивается	Не изменяется		Уменьшается	
Количество присадочного металла, вводимого в сварочную ванну за единицу времени	Увеличивается		Практически не изменяет				ся	Не изменяется					Увеличивается	Не изменяется

Примечание. Влияние отдельных элементов режима сварки на размеры, форму и состав шва оценивали при условии неизменности остальных элементов режима.

Желаемая форма шва может быть достигнута при различном сочетании элементов режима. Основная задача, возникающая перед технологом при выборе режима сварки конкретных изделий, сводится к определению сочетания его элементов, при котором обеспечивается надлежащее качество сварного соединения при максимальной производительности и минимальной стоимости. Такие оптимальные режимы выбирают в основном опытным путем и заносят в таблицы, которые широко используются в производственных условиях.

Зона термического влияния охватывает полосу основного металла, расположенную между условной границей сплавления и основным металлом, подвергшимся в процессе сварки нагреву до 100° С. Ее ширина и конфигурация изменяются в широких пределах и определяются характером термического цикла сварки, который зависит от теплофизических свойств основного металла, режима сварки, условий охлаждения, начальной температуры изделия и типа соединения. В результате тепловых и деформационных процессов в этой зоне происхо-

дят изменения структуры и свойств металла по сравнению с аналогичными свойствами его в исходном состоянии.

Эти изменения неодинаковы для разноудаленных от металла шва участков, что и определяет различие их свойств. При сварке низкоуглеродистой и низколегированной горячекатаной стали в зоне влияния различают такие характерные участки (см. рис. 26). Участок перегрева *2—1* начинается от границы сплавления. Металл на этом участке претерпевает аллотропические превращения, причем в результате значительного перегрева происходит рост аустенитного зерна. Металл на этом участке, в тех случаях, когда перегрев сочетается с последующей закалкой, характеризуется пониженной пластичностью и меньшей стойкостью против перехода в хрупкое состояние. Оптимальная технология сварки должна обеспечивать минимальное ухудшение свойств на этом участке.

В зоне перегрева особо следует выделить микроучасток интенсивной диффузии *2—1′*, расположенный непосредственно за условной границей сплавления

и захватывающий часть оплавленных в процессе сварки зерен основного металла. Металл участка интенсивной диффузии зоны влияния характеризуется химической неоднородностью и как по строению, так и по свойствам заметно отличается от находящегося рядом металла участка перегрева. На некотором расстоянии от границы сплавления участок перегрева сменяется участком перекристаллизации *2—2*, металл которого в процессе нагрева приобрел полностью аустенитную структуру. Этот участок переходит в участок неполной перекристаллизации *2—3*. Наряду с зернами основного металла, не изменившимися при сварке, присутствуют и зерна, образовавшиеся в процессе перекристаллизации. Далее располагается участок рекристаллизации *2—4*. Здесь происходит сращивание раздробленных при нагартовке зерен и некоторое разупрочнение металла по сравнению с исходным состоянием. Особо ощутимо снижение прочности на этом участке для термоупрочненной стали. На этом же участке при сварке низкоуглеродистой и среднеуглеродистой стали в некоторых случаях наблюдается снижение ударной вязкости и повышение прочности металла. Можно предположить, что эти изменения связаны со старением после закалки и дисперсионным твердением. Заканчивается зона влияния участком старения *2—5*, где в ряде случаев наблюдается значительное охрупчивание металла. Наиболее интенсивно процесс охрупчивания протекает на участке, подвергшемся нагреву в интервале температур 100—300° С. Ширина и конфигурация различных участков зоны влияния определяются условиями протекания сварочного процесса. При сварке термически обработанной, литой и подвергшейся штамповке стали рассматриваемого типа и стали и сплавов других классов характер и строение зоны влияния могут быть и другими.

В рассмотренных участках сварного соединения особо следует выделить зону *А* неоднородности (см. рис. 26). В нее входят находящиеся по обе стороны от границы сплавления участки интенсивной диффузии металла шва *1—1* и интенсивной диффузии зоны влияния *2—1'*. В пределах этих участков непосредственно по границе сплавления и происходит собственно сварка, т. е. межатомное взаимодействие находившихся в физическом контакте металлов сварочной ванны и частично оплавленных зерен основного металла. Ширина зоны неоднородности невелика, но влияние ее на работоспособность сварного соединения весьма значительно. Здесь наиболее часто зарождаются усталостные и хрупкие трещины, идет процесс ножевой коррозии и др. Это, вероятно, связано с сосредоточением как структурной, так и геометрической концентрации напряжений. Последняя обусловлена характером перехода от металла шва к металлу зоны влияния.

Ухудшение свойств основного металла наблюдается и в других участках зоны влияния (например, на участке старения). Но оно не усугубляется геометрической концентрацией напряжения и не приводит, в подавляющем числе случаев, к опасным для прочности сварного соединения последствиям. При многослойных швах строение сварного соединения отличается от приведенной выше схемы рядом особенностей. К ним относятся: макро- и микронеоднородность металла шва; наличие зоны неоднородности не только по границе сплавления между металлом шва и металлом зоны влияния, но и между отдельными слоями шва; наличие зоны влияния в предшествующих слоях многослойного шва (межслойные зоны влияния); наличие в основном металле и металле шва вторичной зоны влияния и вторичной межслойной зоны влияния, образующихся в результате многократного термического воздействия, обусловленного многослойностью строения шва. Строение и свойства металла шва и зоны влияния при многослойной сварке зависят еще от ряда факторов (количества и взаиморасположения слоев, темпа заполнения разделки и др.) и в каждом конкретном случае могут отличаться друг от друга.

Основной металл располагается за зоной влияния и не претерпевает в процессе сварки изменений по сравнению с исходным состоянием.

Для сварки под флюсом характерно использование дуги высокой мощности (см. с. 164, режимы III и IV) и, как следствие, глубокое проплавление основного

металла, и значительная доля участия его в металле шва. Поэтому влияние, оказываемое основным металлом при сварке под флюсом на надежность конструкции по сравнению с другими способами дуговой сварки возрастает. Очевидно, что если вести сварку на режимах I и II (с. 164), то требования будут аналогичными требованиям, предъявляемым к металлу при сварке в защитных газах и покрытыми электродами. Как известно, при сварке под флюсом может быть воспроизведен любой режим, характерный для других разновидностей дугового процесса, но оптимальными определяющими эффективность способа являются режимы, отличающиеся высокой мощностью источника нагрева. Для изготовления изделий с применением сварки под флюсом используют углеродистую и легированную сталь и сплавы средней и повышенной чистоты, двухслойную сталь, разнородные металлы. Сваривают титан, никель, медь и сплавы на их основе, сплавы на основе магния. По флюсу варят алюминий и сплавы на его основе.

Особенности сварки стали. Применяют толстолистовую широкополосную (универсальную) и рулонную сталь, фасонный и сортовой прокат, литье, поковки и штамповки. Наиболее широко используют углеродистую и легированную сталь. По содержанию углерода и легирующих, упомянутые виды стали следует разделить на категории, приведенные в табл. 10.

10. Категории стали по содержанию углерода и легирующих

Сталь	Содержание углерода в готовом прокате, %	Суммарное содержание легирующих, %	Сталь	Содержание углерода в готовом прокате, %	Суммарное содержание легирующих, %
Низкоуглеродистая	До 0,24	Содержание Mn до 0,8%, Si — до 0,5%	Среднелегированная низкоуглеродистая	До 0,18	От 5 до 10
Среднеуглеродистая	От 0,25 до 0,37		Среднелегированная среднеуглеродистая	От 0,19 до 0,26	
Высокоуглеродистая	От 0,38 до 0,55*1		Среднелегированная высокоуглеродистая	От 0,27 до 0,40	
Низколегированная: низкоуглеродистая	До 0,18*2	До 5%	Высоколегированная низкоуглеродистая	До 0,15	От 10 до 55
среднеуглеродистая	От 0,19 до 0,26		Высоколегированная среднеуглеродистая	От 0,16 до 0,24	
Низколегированная высокоуглеродистая	От 0,27 до 0,40*1		Высоколегированная высокоуглеродистая	От 0,21 до 0,40	

*1 Сталь с более высоким содержанием углерода для изготовления сварных конструкций, как правило, не применяется.

*2 К этой группе относят сталь с содержанием углерода до 0,23%. Однако опыт показал, что сталь с содержанием углерода 0,19—0,22% по условиям сварки должна быть отнесена к низколегированной среднеуглеродистой стали.

Сварка низкоуглеродистой и низколегированной низкоуглеродистой стали. При сварке низкоуглеродистой и низколегированной низкоуглеродистой горячекатаной стали с небольшими ограничениями можно применять любые характерные для сварки под флюсом

и диктуемые технологической целесообразностью высокопроизводительные режимы.

Ограничения в основном сводятся к получению коэффициента формы, при котором обеспечивается стойкость металла шва данного химического состава против кристаллизационных трещин (см. рис. 29) и к выбору максимальной линейной скорости сварки, при которой наблюдается нормальная без зоны несплавления и с благоприятными очертаниями поверхности форма шва, надлежащая стойкость против пор и благоприятная форма проплавления, гарантирующая малую вероятность непроваров, связанных с неточным направлением электрода по месту сварки. При сварке стали этой группы, как правило, применяют холоднотянутую проволоку сплошного сечения, поставляемую по ГОСТ 2246—70. Сварку ведут при таких сочетаниях флюсов и проволок: 1 — плавленые низкокремнистые марганцовистые флюсы и кремнемарганцевые проволоки; 2 — плавленые высококремнистые марганцевые флюсы и низкоуглеродистые нелегированные или легированные марганцем проволоки; 3 — плавленые высококремнистые безмарганцевые флюсы и низкоуглеродистые легированные марганцем проволоки; 4 — керамические флюсы и низкоуглеродистые проволоки. Наиболее широко применяется второе сочетание флюса и проволоки.

Химический состав металла шва при сварке низкоуглеродистой и низколегированной низкоуглеродистой стали близок к составу основного металла. Он отличается от последнего лишь более низким содержанием углерода, а в ряде случаев — серы и фосфора.

При сварке низкоуглеродистой стали в швах повышается также содержание марганца и кремния. При сварке низколегированной низкоуглеродистой термоупрочненной стали наблюдается разупрочнение в зоне термического влияния. Это обусловливает необходимость в ограничении режимов сварки, с тем чтобы свести к минимуму эффект разупрочнения. При сварке низколегированной среднеуглеродистой стали снижается стойкость металла шва против кристаллизационных трещин и возрастает вероятность образования закалочных структур в металлах шва и зоны влияния. Это приводит к необходимости некоторого ограничения режимов сварки.

Среднеуглеродистая сталь отличается от низкоуглеродистой только более высоким содержанием углерода (см. табл. 10). Повышение содержания углерода приводит к резкому снижению стойкости металла швов против кристаллизационных трещин и к увеличению вероятности образования малопластичных закалочных структур в зоне термического влияния.

Для преодоления трудностей, возникающих при сварке такой стали, стремятся снизить долю участия основного металла в металле шва (за счет уменьшения силы тока и использования сварки с разделкой кромок) и увеличить коэффициент формы провара. Сварку ведут на режимах, не характерных для автоматического процесса и приближающихся к режимам, применяемым при полуавтоматической сварке под флюсом и в защитных газах и даже при ручной, дуговой сварке. При этих условиях производительность невелика, а свойства сварного соединения не уступают свойствам его при других способах дуговой сварки. Флюсы и электродные проволоки применяют те же, что и при сварке низкоуглеродистой стали.

Сварка высокоуглеродистой стали из-за повышенного содержания углерода сопряжена с рядом трудностей. Сварку под флюсом применяют главным образом для наплавочных работ. Сварку ведут с предварительным или предварительным и сопутствующим подогревом изделия.

Развитие отечественной металлургии характеризуется все более широким применением низколегированной стали средней прочности. Обладая более высокой, чем у высокоуглеродистой стали, прочностью, она отличается хорошей свариваемостью. Поэтому следует по возможности заменять высокоуглеродистую сталь на низколегированную.

Особую подгруппу в разряде низколегированной низкоуглеродистой стали составляет низколегированная низкоуглеродистая сталь высокой прочности,

обладающая повышенной стойкостью против перехода в хрупкое состояние, повышенной теплоустойчивостью и коррозионной стойкостью. Комплекс необходимых свойств этой стали достигается в результате сочетания многокомпонентного легирования с закалкой и отпуском. При этом обеспечивается упрочнение твердого раствора и измельчение структуры. Технология сварки такой стали под флюсом рассчитана на снижение вероятности образования холодных и кристаллизационных трещин и сохранение металлом околошовной зоны необходимой и достаточной пластичности, прочности и стойкости против перехода в хрупкое состояние. Из-за необходимости ограничения доли участия основного металла в металле шва и максимального значения погонной энергии преимущества автоматической сварки под флюсом не могут быть использованы в полной мере. Сварку обычно ведут не на типичных для способа режимах, характеризуемых пониженной погонной энергией.

Сварка среднелегированной (низко-, средне- и высокоуглеродистой) теплоустойчивой и конструкционной стали. В связи с особыми физико-химическими свойствами среднелегированной стали, а также высоким уровнем механических свойств при их сварке возникает ряд трудностей. Эти трудности связаны с необходимостью предупреждения образования холодных трещин в зоне влияния и в металле шва, снижения вероятности образования кристаллизационных трещин и обеспечения прочности сварного соединения на надлежащем уровне при возможно более простой термической обработке. При сварке стали данной группы под флюсом не используются все возможности способа в отношении повышения производительности. Сварку в основном ведут на постоянном токе при прямой полярности многослойными швами на небольших погонных энергиях, что ограничивает возможность использования проплавляющего эффекта дуги и легирования металла шва компонентами, входящими в состав основного металла.

Повышение стабильности сварных соединений из стали этой группы достигается за счет регулирования термического цикла сварки и величины временных напряжений. Особое внимание уделяют мероприятиям, направленным на уменьшение содержания водорода в металле шва и зоны термического влияния. Для сварки применяют в основном низкокремнистые флюсы в сочетании с высоколегированными и среднелегированными сварочными проволоками.

Сварка высоколегированной низко-, средне- и высокоуглеродистой стали и сплавов. При сварке стали этой группы применяют низкокремнистые, безкремнистые и фторидные флюсы в сочетании с высоколегированными сварочными проволоками. Применяют и керамические флюсы. Сварочные проволоки характеризуются низким (до 0,10%) содержанием углерода и многокомпонентным легированием. Большое количество проволок поставляется по техническим условиям. Применяемые на практике флюсы в сочетании с соответствующей электродной проволокой, состав которой выбирают исходя из принятого основного металла, позволяют обеспечить надежную работоспособность самых ответственных конструкций. Сварку обычно ведут на постоянном токе при обратной полярности.

При разработке технологии сварки под флюсом следует учитывать пониженную теплопроводность и высокий коэффициент расширения стали, что предопределяет более значительное коробление конструкции и необходимость применения режимов, обеспечивающих максимальную концентрацию источника нагрева. При сварке стали увеличивается проплавляющий эффект, что позволяет сваривать за один проход металл повышенной толщины. Для стойкости против коррозии особое значение имеет состояние поверхности шва, наличие на ней шлака и плавность перехода от металла шва к металлу зоны влияния. Принятые режимы сварки и применяемые сварочные материалы должны обеспечивать высокую стойкость металлов шва против кристаллизационных и холодных трещин и зоны влияния против горячих и холодных трещин, образующихся в основном в стали мартенситного и мартенситно-ферритного классов. Швы, вы-

полняемые на высоколегированной стали, более подвержены образованию кристаллизационных трещин и пор, чем швы, выполненные на низкоуглеродистой и низколегированной низкоуглеродистой стали. Для повышения стойкости против кристаллизационных трещин в металле шва прибегают к ограничению содержания в нем углерода и других примесей и загрязнений, отрицательно влияющих на эту характеристику. С этой же целью вводят в сварочную ванну молибден, марганец, вольфрам и другие легирующие элементы, повышающие стойкость металла шва против трещин. Стремятся к получению швов с двухфазной структурой.

При сварке под флюсом, так же как и при других видах сварки плавлением, соединение неоднородно по своему строению и состоит из участков, имеющих различные свойства (мягкие и твердые прослойки, участки химической неоднородности и пр.). Кроме того, в сварном соединении неизбежно возникают остаточные напряжения, которые в той или иной степени влияют на работоспособность конструкции. Несмотря на все эти положения, сварные соединения, выполненные под флюсом, отличает высокая эксплуатационная надежность и низкий процент отклонений от заданных свойств. При сварке под флюсом стабильность качества соединений при прочих равных условиях при всех видах нагрузки существенно выше, чем при других способах дуговой сварки. При статических нагрузках сварные соединения, выполненные под флюсом, в большинстве случаев по прочности и пластичности не уступают основному металлу, полученным литьем, ковкой и штамповкой. При динамических нагрузках сварное соединение, выполненное под флюсом, иногда уступает основному металлу, однако находится на уровне, обеспечивающем их достаточную работоспособность.

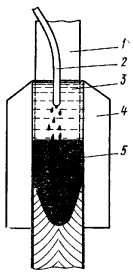


Рис. 30

Как правило, несмотря на неоднородность свойств, наличие концентраторов напряжений и поля остаточных напряжений, вытекающих из самой природы сварного соединения, гарантируется необходимая и достаточная надежность конструкций при самых разнообразных условиях эксплуатации вообще без применения дополнительных трудоемких операций (термическая и механическая обработка, предварительное нагружение и пр.) или с введением местной термической или механической обработки.

Автоматической сваркой под флюсом выполняют прямолинейные, круговые, спиральные и другие стыковые и угловые швы, расположенные в нижнем или близком к нему положении. Максимальное отклонение кромок от горизонтального положения, при котором обеспечивается еще удовлетворительное формирование сварочной ванны, зависит от ее объема и от вязкости расплава и шлака. Полуавтоматическим процессом можно выполнять швы и более сложной конфигурации. Разработан, но находит ограниченное промышленное применение, способ монтажной сварки стыковых швов металла толщиной до 14—16 мм при вертикальном расположении свариваемых кромок. В этих условиях обеспечивается принудительное удержание (формирование) сварочной ванны (рис. 30, где *1* — свариваемая деталь; *2* — электродная проволока; *3* — шлаковая ванна; *4* — медные ползуны; *5* — металлическая ванна).

По технике выполнения и оборудованию этот способ мало отличается от электрошлакового процесса. Принципиально возможна, но из-за сложности обеспечения стабильного формирования шва не находит практического применения сварка горизонтальных швов, расположенных на вертикальной плоскости.

Целесообразность применения автоматической сварки под флюсом обусловлена сечением и длиной шва, конструкцией узла, характером производства. Она должна быть определена в каждом конкретном случае на основании технико-экономических расчетов.

Рассматриваемый процесс широко применяется при наплавочных работах, выполняемых с целью создания на деталях поверхностного, обладающего особыми свойствами слоя, или для восстановления деталей после их износа. Для наплавочных работ характерно все более широкое использование в качестве электрода холоднокатаных, порошковых и специальных лент.

С т ы к о в ы е ш в ы. Сваркой под флюсом выполняют стыковые соединения швами различного типа (однослойные одно- и двусторонние, многослойные одно- и двусторонние). Для большинства ответственных конструкций применяют только двусторонние швы. Двусторонние швы могут быть симметричными и несимметричными. При надлежащей технологической дисциплине стыковые швы, выполняемые под флюсом, характеризуются высоким уровнем и стабильностью свойств. Наиболее частыми дефектами являются поры и непровары. Реже

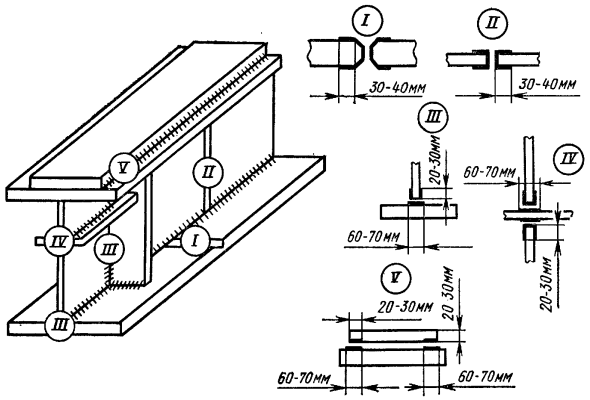


Рис. 31

наблюдаются кристаллизационные трещины, подрезы, шлаковые включения и холодные трещины.

Сборка стыковых соединений ведется из предварительно выправленных и зачищенных деталей. Точность деталей, их чистота и качество сборки оказывают существенное влияние на экономичность и несущую способность конструкции.

В зависимости от толщины основного металла и формы разделки кромки подготовляют обрезкой на ножницах, строганием или газовой резкой. Применяют резку сжатой дугой. Наиболее широко используют машинную кислородную резку. Последующей механической обработки при качественном резе для стали большинства марок не требуется. Необходимая точность подготовки определяется типом шва и режимом сварки. Непосредственно перед сборкой металл в местах, указанных на позициях *I* и *II* рис. 31, должен быть очищен от ржавчины, масла, влаги, рыхлого слоя, окалины, приводящих к образованию в металле шва пор и других дефектов. Особо тщательно следует зачищать торцы элементов. Зачистка элемента после сборки бесцельна, а иногда даже вредна.

Сборка под сварку является трудоемкой и наименее механизированной операцией. Цель ее — установление и фиксация деталей в предусмотренном проек-

том положении с обеспечением свободного доступа к месту сварки и возможности качественной сварки изделия. При сварке под флюсом взаиморасположение деталей часто фиксируется прихватками, выполняемыми покрытыми электродами в защитных газах или под флюсом. Сечение прихваток не должно превышать $^1/_3$ сечения шва, но не более 25—30 мм² при длине 30—120 мм. Расстояние между прихватками 400—800 мм. Рациональна замена прихваток сплошным швом небольшого сечения (технологическим швом). Это значительно повышает стойкость металла рабочего шва против кристаллизационных трещин и предотвращает нарушения взаиморасположения деталей в процессе сварки из-за растрескивания

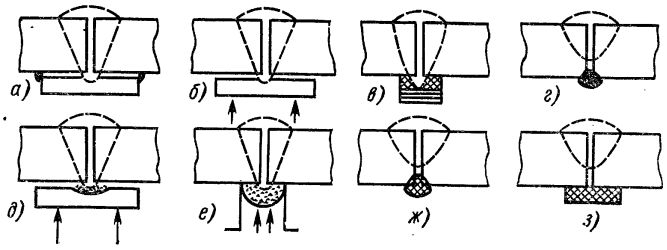


Рис. 32

прихваток. Прихватки и технологический шов рекомендуется выполнять со стороны, обратной наложению первого рабочего шва или слоя. Прихватки и технологические швы перевариваются в процессе сварки основного шва.

Для крепления деталей перед сваркой и в процессе ее применяют также гребенки (удаляемые по мере образования шва), клинья, струбцины, стяжные уголки и другие приспособления. При массовом характере производства используют специальные кондукторы для сборки и сварки. По концам собранных элементов устанавливают планки, скрепляющие детали и служащие для вывода начала и конца шва за пределы свариваемого элемента.

Сварка под флюсом односторонних швов ведется с применением специальных устройств для удержания шлака и сварочной ванны и формирования обратного валика (рис. 32, *а — в, д, е*). При выполнении первого шва при двусторонней сварке также применяют устройства для удержания флюса и шлака и предотвращения затекания расплава в зазор (рис. 32 *г, ж, з*). Сварку швов со второй стороны в этом случае выполняют на весу. На рис. 32: *а* — остающаяся подкладка; *б* — временная подкладка; *в* — гибкая лента; *г* — ручная подварка; *д* — медно-флюсовая подкладка; *е* — флюсовая подушка; *ж* — заделка зазора огнестойкой материей; *з* — асбестовая подкладка.

11. Параметры режима сварки многослойных швов

Тип кривой на рис. 33	Вид сварки	Средняя сила тока, А	Вылет электрода, мм	Средний коэффициент наплавки, г/А · ч	Среднее количество наплавленного металла, кг/ч
1	Под флюсом проволокой диаметром 4 и 5 мм	825	45±5	15	12,4
2	Под флюсом проволокой диаметром 1,4—2 мм	375	20±2	17	6,4
3	Под флюсом проволокой диаметром 1—1,2 мм	150	13±1,5	18	2,7
4	Покрытыми электродами диаметром 4 и 5 мм	235	—	8,5	1,8

Сварку под флюсом широко применяют при выполнении стыковых швов различных типов. О производительности процесса для этого случая можно судить

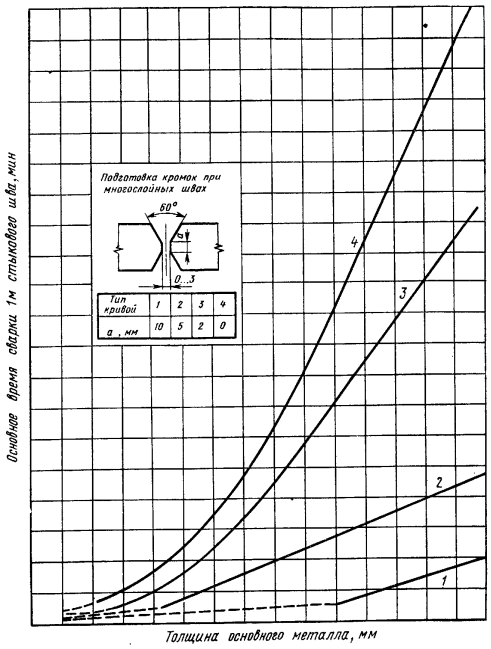


Рис. 33

по данным, приведенным в табл. 11 и на рис. 33, свидетельствующим о том, что производительность растет с увеличением мощности дуги. Это достигается за счет увеличения проплавляющего эффекта дуги и количества вводимого в сварочную ванну за единицу времени (час, смену) присадочного металла. Сварку выполняют одним электродом без наполнителей. На штриховом участке кривых сварку ведут в один слой. Режим сварки определяется толщиной основного металла.

Стыковые однослойные односторонние и двусторонние швы формируются главным образом за счет основного металла доля которого в металле шва может составлять 75%. Швы сваривают без разделки кромок с технологическим зазором 0—3 мм, с обязательным зазором или разделкой кромок. Применение однослойных швов при сварке низкоуглеродистой и низколегированной низкоуглеро-

дистой машиностроительной стали под флюсом является оптимальным решением. Можно сваривать металл в соответствии с данными, приведенными в табл. 12. Цель разделки или обязательного зазора между кромками листов сводится к размещению избыточного присадочного металла и к некоторому увеличению глубины проплавления за счет погружения столба дуги в разделку. Площадь разделки или зазора должна быть равна 50—60% площади, образуемой присадочным металлом. Конфигурация разделки может быть любой, но должна вписываться в зону проплавления (рис. 34).

12. Максимальная толщина металла *1, мм

Условия сварки	Односторонний шов		Двусторонний шов	
	С	Б	С	Б
Проволока диаметром 4—6 мм, сила тока 600—1300 А	24	18	42	32
Проволока диаметром 1,4—2 мм, сила тока 260—450 А	10	7	17	10
Проволока диаметром < 1,4 мм и ручная дуговая сварка покрытыми электродами диаметром 4—5 мм; сила тока до 250 А	6	4	10	7

*1 С — с обязательным зазором или разделкой; Б — без обязательного зазора или разделки.

Предпочтения из-за более благоприятной направленности кристаллитов металла шва и отсутствия предпосылок для образования специфических дефектов типа шлаковых каналов заслуживает сварка с разделкой кромок. В этом случае обеспечивается, так же как и при сварке с обязательным зазором, плавное очертание усиления. Что касается односторонних швов, то в производственных условиях пока не удается обеспечить стабильность их качества. Даже при качественном выполнении таких швов специфические условия их формования предопределяют некоторое снижение стойкости против кристаллизационных трещин и величины

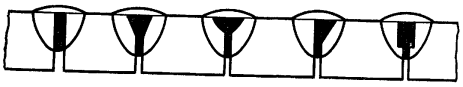


Рис. 34

ударной вязкости при минусовых температурах. Кроме того, при меньшей толщине основного металла приходится прибегать к многослойной сварке. Поэтому рациональность перехода на одностороннюю сварку в случае, когда возможна двусторонняя сварка, не бесспорна.

Стыковые многослойные односторонние и двусторонние швы сваривают с разделкой кромок, цель которой — создать условия для погружения источника теплоты в толщу свариваемого изделия и тем самым обеспечить возможность соединения металла на всю толщу. В процессе скоса кромок за счет удаления основного металла образуется полость заданной формы, которая затем заполняется присадочным металлом. К разделке приходится прибегать в тех случаях, когда мощность дуги недостаточна для сварки металла данной толщины в один слой, даже с двух сторон или необходимо применение многослойных швов по технологическим соображениям, связанным со свойствами основного металла или спецификой эксплуатации изделия. Шов при многослойной сварке формируется в основном за счет присадочного металла, доля которого в металле шва может достигать 70%. Некоторая часть расчетного сечения шва образуется за счет проплавления основного металла в месте притупления.

Конфигурация разделки кромок при всех условиях должна обеспечивать удобство выполнения первого слоя. Для этого она и нужна. Для уменьшения количества наплавляемого металла, снижения величины остаточных напряжений и деформации, а также для экономии электроэнергии и времени рационально увеличивать притупление и снижать площадь разделки. Очевидно, что эти мероприятия следует проводить в пределах, обеспечивающих возможность получения качественного шва. Весьма заманчивым с точки зрения снижения сечения разделки представляется уменьшение угла скоса кромок. Однако при снижении угла скоса кромок ниже некоторой критической величины не создаются условия для качественного выполнения первого слоя. Чем меньше угол скоса, тем уже должен быть шов (для гарантии провара вершины разделки и притупления), т. е. меньше коэффициент его формы (рис. 35). При этих условиях резко возрастает вероятность образования в металле шва кристаллизационных трещин и непровара кромок из-за «ухода» узкого шва с оси соединения. Оптимальной при многослойных швах является разделка кромок, показанная на рис. 36, для сварки проволокой диаметром 3—5 мм металла любой толщины. При сварке проволокой диаметром 1,4—2 мм притупление должно быть уменьшено до 5 и 3 мм, а при сварке проволокой диаметром < 1,4 — до 3 и 1,5 мм. При двусторонней сварке разделку выполняют с двух сторон, а притупление увеличивают примерно в 1,7 раза.

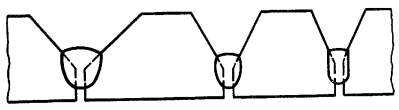


Рис. 35

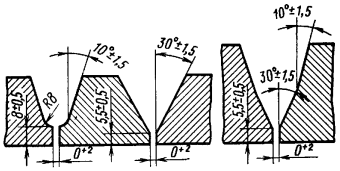


Рис. 36

Как по условиям формирования первого слоя, так и площади разделки предпочтения при сварке металла любой толщины заслуживает рюмкообразная форма разделки кромок. Ее преимущества возрастают с увеличением толщины металла. Так называемая щелевая разделка из-за сложности удаления шлаковой корки малоприемлема, а для металла толщиной < 50 мм при возможности двусторонней сварки и нецелесообразна.

При сварке многослойных швов особое внимание следует уделять выполнению первых двух слоев (при двусторонней сварке — с каждой стороны). Благодаря не жесткому скреплению свариваемых кромок, повышенной доле участия основного металла в металле шва, большой скорости остывания, необходимости сваривать слои с коэффициентом формы провара 1,2—1,3, сложности направления электрода по месту стыка (особенно в глубокой разделке) в первом слое резко увеличивается вероятность образования непроваров, трещин, пор и других дефектов. Поэтому, сварку второго слоя следует вести строго по оси первого, на режиме, обеспечивающем переплавление первого слоя на $^2/_3$ его глубины. При наложении первого слоя со второй стороны первый слой, сваренный с первой стороны, должен переплавляться на глубину оставшейся его части.

Таким образом, этот первый слой является технологическим, т. е. полностью перевариваемым при наложении последующих слоев. Второй слой со второй стороны также должен свариваться строго по оси первого слоя. При такой технологии почти полностью устраняются условия, способствующие возникновению дефектов в первом слое. При сварке всех слоев, кроме первых двух (при двусторонней сварке с обеих сторон), можно использовать разнообразные методы, повышая производительность за счет увеличения количества металла, вводимого в сварочную ванну за единицу времени. К ним относятся сварка двумя и большим числом дуг, сварка на увеличенном вылете, сварка с присадочной проволокой, укладываемой в разделку или подаваемой в зону дуги в процессе сварки, сварка с добавкой крупки, железного порошка, окатышей, рубленой проволоки, гранулированной присадки и наполнителей в любом другом приемлемом для данного назначения виде. Выбор того или иного метода повышения количества вводимого в шов за единицу времени присадочного металла зависит от конкретных условий и должен быть определен технологом.

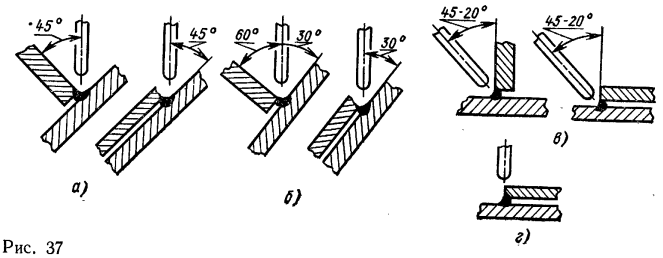


Рис. 37

Угловые швы, выполняемые под флюсом, могут быть однослойными и многослойными, сплошными и прерывистыми. Коэффициент формы такого шва лежит в пределах 1,5—1,1; при меньшем значении коэффициента резко возрастает вероятность образования кристаллизационных трещин. Сборку элементов с угловыми швами ведут по той же схеме что и при стыковых швах. В основном применяют прихватки и технологические швы. Эти швы при сварке тавровых соединений, как правило, выполняют со стороны обратной наложению первого и рабочего шва. Со стороны первого шва в этом случае накладывают небольшое число прихваток. Прихватки и технологические швы переваривают в процессе сварки рабочего шва. Непосредственно перед сборкой металл в местах, указанных на позициях *III*, *IV* и *V* рис. 31, освобождают от загрязнений всех видов. Для предотвращения протекания металла в зазор при величине его более 2 мм со стороны, обратной наложению первого шва, сваривают беглый шов, заделывают зазор огнестойкими материалами с последующей засыпкой его флюсом и прочее.

При зазорах до 2 мм сварку ведут «на весу». Угловые швы сваривают в положениях, показанных на рис. 37, где: *а* — симметричная лодочка; *б* — несимметричная лодочка; *в* — «не в лодочку»; *г* — с оплавлением кромки. По условиям формирования и возможности выполнения однослойных швов большого сечения лучше сваривать «в лодочку» (табл. 13). Для увеличения глубины проплавления по месту сопряжения деталей (эффективной глубины проплавления) рекомендуется производить сварку «в несимметричную лодочку», а при сварке «не в лодочку» несколько сдвигать электрод в сторону вертикально расположенного элемента. Сварка угловых швов с оплавлением кромки возможна при толщине верхнего элемента до 8 мм.

Для угловых швов необходимость сварки многослойных швов определяется плохим формированием металла при достижении сварочной ванной некоторой критической для данных условий массы. Исходя из этой предпосылки, в один слой можно сваривать швы, катеты которых не превышают величин, приведенных в табл. 13.

Прочность углового шва определяется его длиной, задаваемой конструкцией узла, и расчетной высотой шва, определяющей слабое место, по которому может произойти разрушение соединения, и прочностью металла шва.

Угловые швы при сварке под флюсом формируются за счет присадочного металла, заполняющего угол между соединяемыми элементами и образующего его внешнюю часть, и проплавления основного металла, составляющего внутреннюю его часть. Абсолютная величина этих участков и доля их участия в образовании расчетной высоты углового шва зависят в основном от режима сварки (рис. 38, табл. 14). Частным случаем является угловой шов таврового соединения с полным проплавлением стенки. Выполнение таких швов технологически затруднено из-за сложности обеспечения полного провара по всей длине элемента как при однослойных, так и при многослойных швах. При многослойных швах, кроме того, возникают трудности, обусловленные неблагоприятной формой проплавления при сварке первого слоя и трудоемкостью удаления шлаковой корки. При сварке с полным проваром стенки возрастает вероятность слоистого растрескивания. Следует обратить внимание конструкторов на нетехнологичность таких швов и на то, что их можно применять только в случае необходимости, подтвержденной практикой эксплуатации.

13. Катеты угловых швов, мм

Положение сварного соединения и электрода в пространстве	Диаметр проволоки, мм	
	3—5	⩽ 2,5
	18×18	13×13
	9×9	9×9

Примечание. В таблице указаны максимальные катеты при нормальной форме шва при том же сечении, но вогнутой форме поверхности они будут больше, а при выпуклой — меньше.

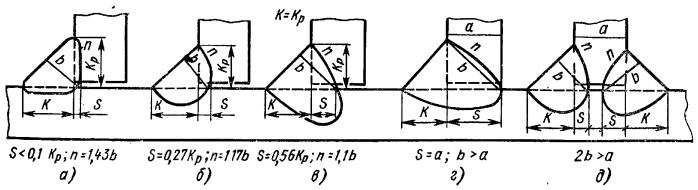
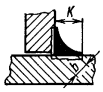


Рис. 38

В случае необходимости при автоматической сварке однослойным двусторонним швом можно обеспечить провар стенки толщиной до 14 мм — одним электродом и 18 мм — двумя электродами. За счет скоса кромки можно обеспечить полный провар стенки соответственно при толщине ее 17 и 21 мм. При большей толщине стенки необходимо переходить к выполнению многослойных швов с разделкой кромок вертикального элемента.

14. Расчетная высота шва в зависимости от условий сварки

Условия сварки	Тип шва	Эффективная глубина проплавления S	Расчетная высота шва b	Соотношение катетов швов, выполненных по данному варианту и вручную, имеющих одинаковую расчетную высоту	
Проволока диаметром 3—5 мм, сила тока $\geqslant$ 550 А*1		0,56 K	1,1 K	$K = 0{,}64\ K_р$	$K_р = 1{,}56\ K$
Проволока диаметром 1,4—2,5 мм, сила тока 250—500 А*2		0,27 K	0,9 K	$K = 0{,}77\ K_р$	$K_р = 1{,}28\ K$
Проволока диаметром $<$ 1,4 мм, сила тока $<$ 250 А*2		—	0,7 K	$K = K_р$	$K_р = K$

*1 Режим применяют только при автоматическом процессе.
*2 Режим характерен для полуавтоматической сварки; возможна автоматическая сварка.
K — катет шва, выполненного по данному варианту.
$K_р$ — катет равнопрочного шва, выполненного вручную покрытыми электродами.

Увеличение линейной скорости выполнения шва, так же как и для стыковых швов, ограничивается некоторым критическим значением. В закритическом диапазоне наблюдается образование подрезов и зоны несплавления. Из-за специфических условий формирования углового шва, связанных с геометрией соединения, критическая скорость в рассматриваемом случае значительно ниже, чем при сварке стыковых швов. Практика показывает, что при сварке даже несколькими электродами в общую ванну критическую скорость нельзя повысить больше чем до 100 м/ч. При сварке в раздельные ванны скорость может быть несколько увеличена. При полуавтоматической сварке она не превышает 70 м/ч, что связано с физиологическими возможностями человека.

Значительный объем работ, выполняемых при сварке под флюсом, приходится на долю слабонагруженных угловых швов. Минимальные размеры таких швов назначают исходя из технологических соображений в зависимости от толщины и марки основного металла. Режимы сварки должны гарантировать нормальное формирование, надлежащую стойкость против образования дефектов и необходимые и достаточные механические свойства металлов шва и зоны влияния. При сварке слабонагруженных швов необходимо обеспечить стабильное качество сварных соединений. При несоблюдении этих условий и необходимости проведения большого объема работ по ремонту швов неоправданное снижение их сечения приведет не к повышению, а к снижению производительности, увеличению расхода сварочных материалов и электроэнергии и к снижению качества выпускаемой продукции.

Значительное повышение культуры производства на отечественных заводах и монтажных площадках, улучшение методов проектирования и изготовления

сварных конструкций позволяют рекомендовать снижение размеров слабонагруженных угловых швов до величин, показанных на рис. 39 и приведенных в табл. 15.

При работе на автоматах с постоянной скоростью подачи проволоки и скоростью сварки вместо катетов шва можно контролировать их сечение. Данные, показанные на рис. 39 и в табл. 15, относятся к двусторонним поясным и другим слабонагруженным швам, сваренным автоматом и полуавтоматом под флюсом электродной проволокой диаметром 1,4 и более мм на стали с пределом текучести до 40 кгс/мм² включительно и эквивалентом углерода до 0,45%. Для сталей с пределом текучести более 40 кгс/мм² минимальные размеры слабонагруженных швов устанавливаются при разработке технологии их сварки.

Эквивалент углерода определяется из зависимости

$$C_{эк} = C + \frac{(Mn + Si)}{6} + \frac{(Cr + Ni + V)}{S} + \frac{(Cu + Mo)}{IS}.$$

Подсчет ведется для среднего марочного состава стали.

Уменьшение катетов швов в пределах, предусмотренных на рис. 39 и табл. 15, не снижает несущей способности элементов. При сварке электродной проволокой

15. Размеры слабонагруженных угловых швов

Толщина S более толстого элемента, мм	Минимальный катет шва K, мм	Минимальное сечение внешней части шва $F_в$, мм²
6—10	4	8
11—16	5	13
17—22	6	18
23—32	7	25
33—40	8	32
41—80	9	40
81—100	10	50

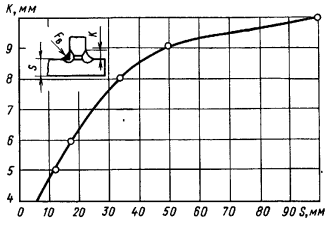


Рис. 39

диаметром менее 1,4 мм в конструкциях, свариваемых или эксплуатируемых при температуре ниже —40° С, катеты угловых швов следует повышать на 1 мм при толщине металла до 40 мм включительно и на 2 мм при толщине металла $>$ 40 мм. При сварке «в лодочку» все слабонагруженные швы можно выполнять в один слой. При сварке «не в лодочку» все швы с катетами более 9 мм переходят в разряд многослойных (см. табл. 13). Очевидна рациональность выполнения швов при положении «в лодочку».

Уменьшение катетов шва ниже 4 мм для металла толщиной $\geqslant$ 6 мм нерационально как с точки зрения качества шва, так и производительности процесса.

Если в условиях данного производства не удается гарантировать качество угловых швов при размерах, указанных на рис. 39 и в табл. 15, то эти размеры должны быть увеличены до значений, при которых обеспечивается стабильное качество.

Сварка под флюсом широко применяется при выполнении рабочих угловых швов. Размеры таких швов определяют расчетом в зависимости от типа шва и режима сварки. Допускаемое напряжение определяют обычно исходя из допускаемого напряжения основного металла.

Размеры угловых швов изменяются в широких пределах, что определяет технологическую необходимость выполнения не только однослойных, но и многослойных расчетных швов.

Однослойные расчетные швы. В один слой можно выполнять швы, размер которых оговорен в табл. 15. Расчет угловых швов, выполняемых под флюсом проволокой сплошного сечения, ведут исходя из величин

16. Катеты шва, мм

Диаметр проволок, мм	Положение в пространстве	Тип шва	Расчетная высота шва, мм																	
			4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Менее 1,4		Однослойные и многослойные швы $b = 0{,}7K$; $S = 0$	6	7	9	10	12	13	15	16	17	19	20	22	23	24	25	27	28	30	31
		Однослойный шов $b = 0{,}9K$; $S = 0{,}27K$	5	6	7	8	9	10	11	12	Выполнить шов в один слой нельзя										
		Многослойный шов $S = 0{,}27K_1 = 3{,}5$ мм	Шов выполняют в один слой								14	15	16	18	19	20	22	24	25	27	28
1,4—2,5		Однослойный шов $b = 0{,}9K$; $S = 0{,}27K$	5	6	7	8	9	Выполнить шов в один слой нельзя													
		Многослойный шов $S = 0{,}27K_1 = 2{,}5$ мм	Шов выполняют в один слой					11	12	14	15	17	18	19	21	22	24	25	27	28	30
3—5		Однослойный шов $b = 1{,}1K$; $S = 0{,}56K$	4	5	6	7	8	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Выполнить шов в один слой нельзя		
		Многослойный шов $S = 0{,}56K_1 = 10$ мм	Шов выполняют в один слой																20	21	22
		Однослойный шов $b = 1{,}1K$; $S = 0{,}56K$	4	5	6	7	8	8	Выполнить шов в один слой нельзя												
		Многослойный шов $S = 0{,}56K_1 = 5$ мм	Шов выполняют в один слой						10	11	12	14	15	16	18	19	21	22	24	25	27

Примечания: 1. Если катеты, определенные по расчету, меньше катетов, назначаемых по технологическим соображениям (см. рис. 39), то они должны быть увеличены до размеров последних.
2. Размеры шва определены из условия, что прочность его равна прочности основного металла.
3. Размеры катетов округлены до целого значения.
K_1 — катет первого слоя.

(табл. 16), установленных на основе обработки обширных статистических данных. Расчет ведут по минимальному значению эффективной глубины проплавления (проплавление по месту сопряжения соединяемых элементов). Сварку выполняют в нижнем положении без колебания электродной проволоки и без введения дополнительного металла, на переменном токе или на постоянном токе при обратной полярности.

Величина катетов внешней части швов, имеющих одинаковую расчетную высоту, выполненных ручной дуговой сваркой и различными вариантами сварки под флюсом при сварке «в лодочку» и «не в лодочку», приведена в табл. 16 и на рис. 40 (*а* — однослойный шов; *б* — многослойный шов), из которых следует, что при сварке под флюсом достигается существенное уменьшение сечения внешней части углового однослойного и многослойного швов и, как следствие, снижение времени, затрачиваемого на их выполнение, расхода материалов и электроэнергии. Снижение сечения расчетных однослойных швов может быть обеспечено за счет повышения прочностных характеристик металла этих швов. Однако повышение прочности металла шва по сравнению с прочностью основного металла дает возможность снизить сечение углового шва только до некоторых пределов, зависящих от конфигурации шва (см. рис. 38). Повышать прочность металла шва сверх определенных пределов бесполезно, так как слабым местом становится металл зоны влияния, по которому и происходит разрушение. Для вариантов, показанных на рис. 38, *г*, *д*, любое повышение прочности металла шва бесполезно. Как указывалось выше (см. рис. 28), реальный предел текучести угловых однослойных швов существенно превышает предел текучести основного металла. При сварке проволокой $d = 3 \div 6$ мм, силе тока $I \geqslant 550$ А и $b = 1{,}1K$ эффективно увеличивать реальный предел текучести металла швов по сравнению с пределом текучести основного металла на 10%, при $d = 1{,}4 \div 2{,}5$ мм, $I = 250 \div 500$ А и $b = 0{,}9K$ — на 18%, а при $d \leqslant 1{,}4$ мм, $I \leqslant 250$ А и $b = 0{,}7K$ — на 43% (b — расчетная высота шва, мм; K — катет шва, мм). Это же относится и к значению временного сопротивления. В большинстве случаев при введении прочностных показателей реальных механических свойств металла шва в расчет полностью исчерпываются возможности по рациональному снижению размеров однослойных угловых швов на стали с пределом текучести до 40 кгс/мм².

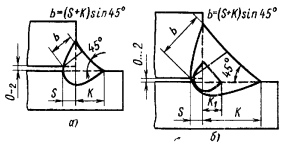


Рис. 40

За счет учета реальных механических свойств металла шва можно обеспечить снижение размеров угловых однослойных швов по сравнению с данными, приведенными в табл. 18. Однако эти возможности для стали с пределом текучести $\leqslant 40$ кгс/мм² в ряде случаев не удается реализовать, так как размеры швов, определенные по расчету, получаются меньшими, чем назначаемые по технологическим соображениям, и их приходится увеличивать до размеров последних. Для стали с пределом текучести > 40 кгс/мм² действительную прочность однослойных угловых швов следует определять при разработке технологии их сварки.

Как указывалось ранее, к сварке угловых многослойных швов приходится прибегать в тех случаях, когда нельзя обеспечить качественное формирование шва заданного сечения при однослойной сварке.

Для обеспечения при многослойном шве, выполненном сваркой под флюсом, той же величины расчетной высоты, что и при однослойном, приходится увеличивать размеры его внешней части. Это обусловлено уменьшением величины эффективной глубины проплавления, которая в данном случае определяется размером первого слоя, а не всего шва (рис. 41, табл. 16).

Максимальное сечение шва, которое можно выполнять в один слой, как видно из данных, приведенных в табл. 15, зависит от положения шва в пространстве и режима сварки.

Значительное увеличение размеров швов, выполненных в один слой, может быть достигнуто при сварке «в лодочку» и при переходе (также при сварке «в лодочку») от полуавтоматического к автоматическому процессу. Первый слой надлежит выполнять без колебательных движений конца электрода и без введения в сварочную ванну дополнительного металла. Значения величины эффективной глубины проплавления для различных условий сварки приведены в табл. 17.

Соотношение между расчетным параметром b многослойного шва (мм) и катетами в его внешней части K в зависимости от расчетного значения эффективной глубины проплавления (табл. 17) определяется из зависимости

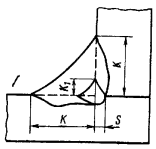


Рис. 41

$$b=(S+K)\sin 45°.$$

Катеты равновеликих по значению расчетного параметра швов, выполненных вручную и механизированной сваркой, определяются из зависимости

$$K_м=\frac{0{,}7K_р-0{,}7S}{0{,}7},$$

где $K_м$ — катеты швов, выполненных сваркой под флюсом, мм; $K_р$ — катеты швов, выполненных вручную, мм; S — расчетное значение эффективной глубины проплавления, мм (табл. 17).

При сварке под флюсом проволокой диаметром менее 1,4 мм, так же как при ручной сварке покрытыми электродами, $b = 0{,}7\ K$. Для увеличения эффективной глубины проплавления в некоторых случаях рационально делать скос кромок стенки или верхнего элемента при нахлесточных соединениях. Площадь разделки, образуемой в этих условиях, должна составлять 50—60% от сечения внешней части первого слоя. О целесообразности учета эффективной глубины проплавления при многослойной сварке угловых швов можно судить по данным табл. 16. Техника выполнения многослойных швов при положении «в лодочку» аналогична технике выполнения стыковых швов. Накладывать второй слой следует строго по оси первого. При выполнении швов «не в лодочку» требуется более точное ведение конца электрода (особенно при выполнении первого слоя) по месту сварки.

17. Эффективная глубина проплавления

Способ сварки	Положение шва в пространстве	Максимальные катеты первого слоя, K_1, мм	Расчетное значение эффективной глубины проплавления S, мм
Автоматическая электродной проволокой диаметром 3—5 мм; эффективная глубина проплавления 0,56 катета первого слоя	«В лодочку»	18×18	10,0
	«Не в лодочку»	9×9	5,0
Автоматическая и полуавтоматическая электродной проволокой диаметром 1,4—2,5 мм; эффективная глубина проплавления 0,27 катета первого слоя	«В лодочку»	13×13	3,5
	«Не в лодочку»	9×9	2,4

Число слоев, необходимых для формирования многослойного шва, зависит от его сечения. Как уже указывалось, первый слой должен иметь максимально допустимое сечение. Сечение последующих слоев при сварке «в лодочку» выбирают в зависимости от конечных размеров, с тем чтобы обеспечить хорошее формирование шва и сохранить повышенную его прочность. С этой целью последующие

слои обычно имеют существенно меньшее сечение, чем первый. При сварке в положении «не в лодочку» все слои имеют практически равное сечение (не более 40 мм²). При сварке второго и последующих слоев многослойных швов можно увеличивать количество вводимого в сварочную ванну за единицу времени присадочного металла. При автоматической сварке «не в лодочку» это может быть осуществлено за счет двухдуговой сварки в раздельную ванну при поперечном и продольном смещении электродов друг к другу и сварке на увеличенном вылете; при сварке полуавтоматом — за счет использования увеличенного вылета. Применение наполнителей для этого случая исключается. При автоматической сварке «в лодочку» могут быть применены те же методы повышения производительности, — сварка с наполнителями и многодуговая сварка в общую ванну. При полуавтоматической сварке также могут быть применены наполнители. Однако при всех условиях следует учитывать, что с увеличением объема сварочной ванны ухудшается формирование шва.

Снижение сечения многослойных швов может быть достигнуто и за счет повышения их прочности. Предел повышения прочности металла многослойного шва зависит от размера и конфигурации шва и изменяется в пределах 15—38%. Во многих случаях такое повышение прочности обеспечивается при учете реальных прочностных характеристик металла шва, сваренного стандартными для данной группы стали электродными проволоками.

Накопленные за последние годы экспериментальные данные свидетельствуют о том, что средний реальный предел текучести металла многослойных угловых швов конструкций, изготовленных из низкоуглеродистой и низколегированной низкоуглеродистой стали с $\sigma_т \leqslant 40$ кгс/мм², сваренных с применением стандартных сварочных материалов, также превосходит предел текучести основного металла. Учет реальных механических свойств металла угловых многослойных швов позволит часть из них перевести в разряд однослойных, а для части несколько уменьшить размеры. Соотношение между катетами многослойных швов, выполненных вручную покрытыми электродами и рассчитанных по ныне применяемой методике, т. е. без учета их реальных механических свойств, и швами, выполненными механизированными способами, рассчитанными с учетом эффективной глубины проплавления от первого слоя и реального предела текучести металла шва, определяется из зависимости

$$K_м=\frac{0{,}7K_р-0{,}7S}{0{,}7m},$$

где m — коэффициент повышения реальной прочности металла многослойного шва по сравнению с прочностью основного металла.

Определение действительных прочностных свойств металла многослойных угловых швов и коэффициента m следует проводить при разработке технологии их сварки. В тех случаях, когда реальная прочность металла многослойных угловых швов ниже той, при которой разрушение пойдет по основному металлу вдоль границы сплавления, она может быть увеличена до пределов, обеспечивающих равнопрочность по шву и околошовной зоне. Для этого можно применить специальные сварочные материалы.

Рациональные области применения и перспективы развития автоматической сварки под флюсом. Преимущества автоматической сварки под флюсом по сравнению с другими способами дуговой сварки при оптимальном режиме в основном сводятся к улучшению и в первую очередь к стабилизации качества сварного соединения, экономии материала и электроэнергии, уменьшению трудоемкости, снижению требований к квалификации рабочего, улучшению условий труда и съема продукции с полезной площади цеха. Однако, несмотря на все эти преимущества, на практике часто возникает вопрос о том, какую из разновидностей механизированной дуговой сварки или электрошлакового процесса рационально использовать для изготовления конкретного изделия. Имеющиеся данные позволяют утверждать,

что преимущества автоматической сварки под флюсом (они рассмотрены ранее) перед автоматическими процессами с использованием всех разновидностей сварки видимой дугой в случае сварки швов, расположенных в нижнем положении, для многих случаев неоспоримы. Это отнюдь не исключает рациональности применения в некоторых случаях автоматической сварки видимой дугой. При толщине металла > 60 мм в ряде случаев рационально применение электрошлакового процесса. Что касается полуавтоматической сварки, то из-за возможности визуального наблюдения за положением конца электрода по отношению к свариваемым кромкам, отсутствия операции по засыпке, удержания, уборки защитной среды и универсальности процесса (возможность сварки в различных пространственных положениях) предпочтение следует отдать полуавтоматической сварке видимой дугой. Это не исключает рациональности применения в некоторых случаях полуавтоматической сварки под флюсом. Следует особо подчеркнуть, что при режимах, характерных для полуавтоматической сварки при всех видах защиты, обеспечиваются практически равные (по машинному времени) производительность и величины остаточных напряжений и деформаций. Задача сводится к тому, чтобы расширить возможности для применения автоматического процесса.

Как пример удачного решения вопроса, укажем на проведенную на основе использования автоматической сварки под флюсом рационализацию конструкции, технологии изготовления и монтажа цилиндрических резервуаров. Эти резервуары ныне монтируют из рулонированных заготовок, свариваемых в условиях завода. Насущной задачей является совершенствование сварочной аппаратуры прежде всего в направлении создания более надежной системы подачи, удержания и уборки флюсом, а также направления невидимой дуги по месту сварки. Особое внимание необходимо обратить на создание оборудования для комплексной механизации сборочно-сварочных операций и на повышение общей культуры производства на заводах и монтажных площадках.

Задачей первостепенной важности является дальнейшее повышение производительности и качества сварного соединения. С этой целью необходимо повысить и стабилизировать качество основного метала и сварочных материалов, полностью использовать и повысить проплавляющий эффект дуги, а для однослойных швов применить проволоку с пониженным коэффициентом расплавления. Создание марок флюсов и сварочных проволок, обладающих лучшими гигиеническими характеристиками, легкой отделимостью шлаковой корки и обеспечивающих получение сварных соединений с оптимальными механическими свойствами и повышенной стойкостью против трещин и пор, является актуальной задачей. Необходимо обратить особое внимание на повышение технологичности сварных конструкций. Наличие в конструкциях швов, которые заведомо невозможно выполнить качественно, недопустимо.

Серьезное внимание должно быть уделено дальнейшему изучению закономерности физико-химических процессов, протекающих при сварке под флюсом. Исходя из особенностей этих процессов, следует решать технологические вопросы.

Широкое развитие должны получить работы по созданию рациональной технологии сварки стали повышенной и высокой прочности и специальных металлов и сплавов, с тем чтобы и в этом случае можно было максимально использовать проплавляющую способность дуги.

СВАРКА В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

Общие сведения. К особенностям дуговой сварки в защитных газах относятся:

высокая степень концентрации дуги, обеспечивающая минимальную зону структурных превращений и относительно небольшие деформации изделия;

высокая производительность;

высокоэффективная защита расплавленного металла, особенно при использовании в качестве защитной среды инертных газов;

возможность наблюдения за ванной и дугой;

низкая стоимость выполнения сварочных работ при применении в качестве защитной среды активных газов (CO_2, паров воды и смесей газов);

возможность сварки металлов различной толщины, в пределах от десяти долей миллиметра до десятков миллиметров;

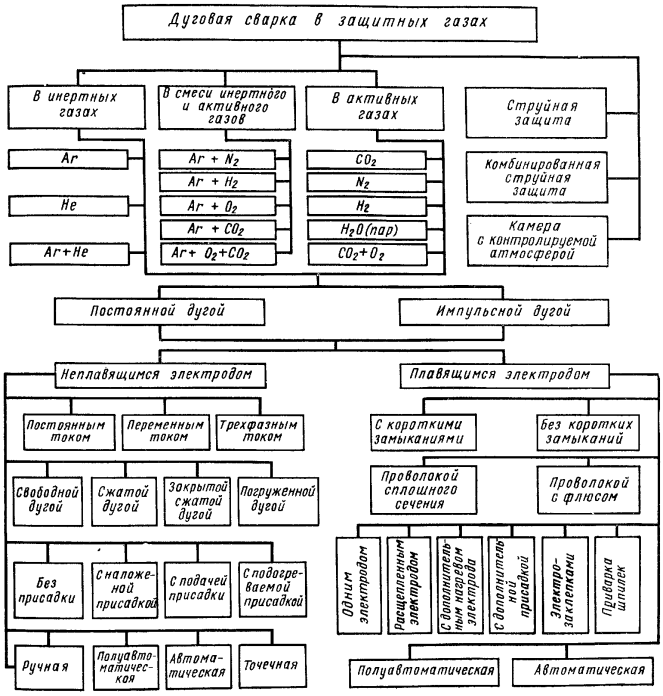


Рис. 42. Классификация способов сварки в среде защитных газов

отсутствие необходимости применения флюсов или обмазок;

широкая возможность механизации и автоматизации;

возможность сварки в различных пространственных положениях.

Дуговая сварка в среде защитных газов имеет разновидности, которые можно классифицировать по следующим признакам: по типу защитных газов, по характеру газовой защиты в зоне сварки, по типу электрода и др. (рис. 42).

Свойства дуги в защитных газах. В энергетическом отношении дугу можно разделить на три зоны: катод, анод и столб дуги (рис. 43). Эти зоны отличаются неравномерным распределением электрического поля.

Общее напряжение на дуге $U_д = U_а + U_к + U_{ст}$, представляющее собой сумму падений напряжений (анодного, катодного и столба дуги), зависит от величины сварочного тока (ис. 44). Как свидетельствуют вольт-амперные характеристики, сварочная электрическая дуга является нелинейной частью электрической цепи: ее сопротивление изменяется с изменением тока.

Вольт-амперную характеристику можно разделить на три области. В первой области (до 100 А) характеристика падающая, проводимость увеличивается в связи с увеличением числа заряженных частиц в столбе дуги. Во второй области (горизонтальной) с увеличением тока дуги имеет место некоторое сжатие столба дуги при ограниченном росте числа заряженных частиц. В третьей области

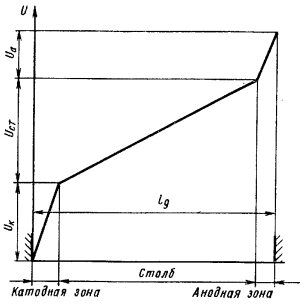


Рис. 43. Схема распределения потенциала по длине дуги

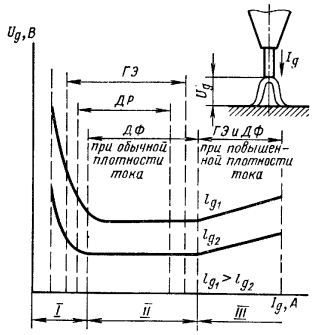


Рис. 44. Вольт-амперная характеристика дуги: *ДР* — ручная дуговая сварка; *ДФ* — дуга под флюсом; *ГЭ* — газоэлектрическая сварка

по мере увеличения тока происходит интенсивное сжатие столба, вольт-амперная характеристика становится возрастающей. На этом участке можно с известным приближением принять $R = \text{const}$.

Столб дуги представляет собой участок дугового разряда, заполненный плазмой. Плазма состоит из электронов, положительных ионов и нейтральных атомов. В условиях дуги плазму можно считать квазинейтральной, а это означает, что концентрация электронов $n_э$ мало отличается от концентрации ионов n_i.

Основной характеристикой плазмы является ее температура. Она обусловливает количество ионизированных частиц, отношение которого к общему количеству частиц называется степенью ионизации.

Применяя каналовую модель дуги (в предположении цилиндрической формы столба) и основываясь на допущении термодинамического равновесия в столбе дуги с учетом потерь энергии за счет лучеиспускания, К. К. Хренов установил зависимость температуры столба от потенциала ионизации:

$$T_д = 810U_i.$$

где U_i — потенциал ионизации газа в дуговом промежутке. Эта зависимость справедлива для дуги с плавящимся электродом.

Дуга в среде инертных газов с неплавящимся электродом имеет коническую форму, мало соответствующую «каналовой» модели. Тем не менее для приближенной оценки средней температуры в центре столба вольфрамовых дуг можно пользоваться соотношением

$$T_д = 1000U_i.$$

На горизонтальном участке вольт-амперной характеристики дуги действительна эмпирическая формула, связывающая температуру с потенциалом ионизации и сварочным током:

$$T_д = 591U_i I^{0,087}.$$

Основные параметры дуги — температура, напряженность поля столба, средняя плотность тока и эффективный радиус сечения столба обусловливаются физическими свойствами газа в дуговом промежутке (табл. 18).

18. Некоторые физические свойства газов, применяемых при сварке

Наименование показателей	Показатели по элементам						
	Ar	He	CO_2	CO	H_2	H	N
Первый потенциал возбуждения, эВ	11,5	19,8	3,0	6,2	11,1	10,2	—
Потенциал ионизации U_i, эВ	15,7	24,6	14,3	14,1	15,4	13,6	14,5
Сечение столкновения $g_e \cdot 10^{20}$, м	2,5	10	25	25	—	130	—
Энергия диссоциации $\omega_д$, Дж/моль	—	—	$2,8\times10^5$	—	$4,3\times10^5$	—	$9,4\times10^5$
Теплоемкость, Дж/моль · °С	21	21	60	—	35	—	—
Коэффициент теплопроводности при 6000 К, Вт/(м · °С)	0,17	1,5	5×10^{-2}	$6,7\times10^{-2}$	2,0	3,8	—

В реальных условиях атмосфера сварочной дуги имеет многокомпонентный состав. Столб дуги с плавящимся электродом заполнен парами электродного металла. Напряженность поля в столбе дуги при прочих равных условиях обусловливается материалом электрода (табл. 19).

19. Напряженность электрического поля в столбе в зависимости от элементов материала электрода

Параметры	Al	B	Sn	Pb	Ag	Ni	Cu	Pd	Cd	Pt	Zn	C
U_i, эВ	5,98	7,29	7,34	7,42	7,57	7,63	7,72	8,33	8,99	9,0	9,39	11,26
E, В/см	24	38	35	42	37	38	38	42,5	55	57	51	85

При сварке неплавящимся электродом количество паровой фазы мало и состав плазмы обусловливается лишь составом защитного газа.

Для сварки неплавящимся электродом применяют в основном инертные газы Ar и He, а также смеси их с молекулярными газами. Газы Ar и He обладают высокими потенциалами ионизации, что затрудняет первоначальное возбуждение дуги. Однако напряженность поля в дуге имеет сравнительно низкое значение (табл. 20), и дуговой разряд в инертных газах отличается высокой стабильностью.

20. Распределение напряжения в сварочных дугах

Электроды		Защитный газ	E, В/см	$U_к+U_а$, В
Катод	Анод			
Сталь	Сталь	CO_2 Ar	24—28 22—24	17—19 16—18
Титан	Титан	Ar	22—24	15—16
Вольфрам	Вольфрам	Ar	8—10	8—10
	Алюминий	Ar He	10—12 22—24	9—11 10—12

Существенное влияние на напряженность поля оказывает теплопроводность газа, особенно той его части, которая обусловлена процессом диссоциации при 4000—6000 К. У водорода, например, при 4000 К коэффициент теплопроводности достигает 12 Вт/(м·°С) (рис. 45).

При плавящемся электроде, несмотря на то, что эффективный потенциал ионизации газа в атмосфере дуги обычно приближается к потенциалу ионизации легкоионизирующихся паров металла, напряжение на дуге существенно зависит от состава защитного газа (рис. 46). Увеличение напряжения на дуге с увеличением концентрации молекулярных газов (H_2, N_2, O_2 и CO_2) объясняется интенсивным охлаждающим действием этих газов в связи с затратами тепла на диссоциацию.

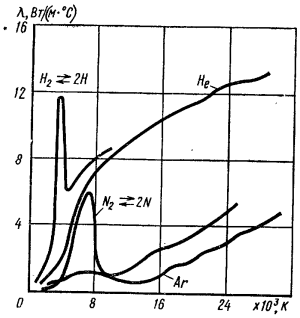


Рис. 45. Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м·°С) водорода, гелия, аргона и азота в зависимости от температуры

Энергия, выделяемая в столбе дуги, составляет значительную долю от общей энергии, выделяемой в дуге. Она передается окружающей среде в основном лучеиспусканием.

Хотя энергия столба дуги не имеет существенного значения в энергетическом балансе электродов, тем не менее характер процессов, протекающих в столбе, оказывает влияние на технологические свойства сварочной дуги, обусловливая концентрацию теплового и силового воздействия на сварочную ванну.

Приэлектродные области. Энергия, выделяемая в приэлектродных областях, обусловливает технологические характеристики сварочной дуги: проплавляющую способность, интенсивность расплавления электродного металла, формирование шва и т. д.

Мощности, затрачиваемые на плавление и испарение катода и анода, отнесенные к 1 А тока дуги,

$$Q_к = U_к - U_в;$$
$$Q_а = U_а + U_в,$$

где $U_к$ и $U_а$ — катодное и анодное падение напряжения; $U_в$ — работа выхода электрона (табл. 21).

21. Работа выхода электронов

Элемент	$U_в$, В	Элемент	$U_в$, В	Элемент	$U_в$, В
C	4,39	Ni	4,81	Ba	2,29
Mg	4,36	Cu	4,47	La	3,30
Al	3,74	V	2,0	Hf	3,53
Ti	4,09	Nb	3,91	Ta	4,12
Fe	4,36	Mo	4,27	W	4,52
CO	4,18	Cs	1,89	Th	3,41

22. Ориентировочные значения катодного $U_к$ и анодного $U_а$ падения потенциала в дугах с плавящимся электродом

Катод	Анод	Сила тока дуги, А	Газовая среда	$U_к$, В	$U_а$, В
Fe Cu Al	Fe Cu Al	100—200	Воздух	16,0—17,0 12,0—13,0 13,0—14,0	6,0—9,0 10,0—11,0
Fe Cu Al	Fe Cu Al	100—250		13,0—13,5 14,5—15,0 13,5—14,0	7,0—8,0 8,5—11,0 8,5—10,0
Fe	Cu	150—250	Ar	8,3—8,7	2,3—3,2
Cu	Fe, $d_э$ = 1 мм	100—200	CO_2	7,5—9,0	1,2—3,3
Fe	Fe, $d_э$ = 1 мм				

Ориентировочные значения $U_к$ и $U_а$ приведены в табл. 22. С несимметричностью выделения энергии связано различие свойств дуги при прямой и обратной полярности. На рис. 47 показано выделение тепла на катоде и аноде в среде

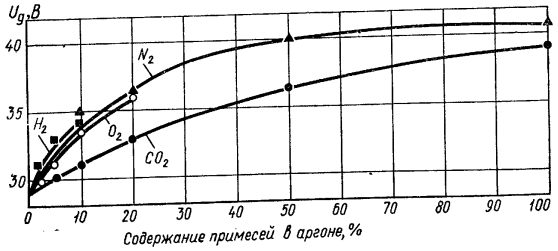


Рис. 46. Зависимость напряжения дуги от состава защитного газа

аргона по данным калориметрирования. На аноде выделяется тепла больше, чем на катоде. Поэтому сварка вольфрамовым электродом на обратной полярности затруднена из-за интенсивного оплавления электрода. Источником электронов, поддерживающих столб дуги в ионизированном состоянии, является

катодная область. Наибольшее значение в сварочной дуге имеют термическая и автоэлектронная эмиссии. Термическая эмиссия играет основную роль в дугах с тугоплавкими катодами (вольфрам, графит), автоэлектронная — в дугах с плавящимися электродами.

При температуре катода 3500—4000 К обеспечивается плотность тока ~ 1000 А/см² (рис. 48). Однако при 3000 К плотность тока составляет всего 50 А/см². Таким образом, термоэмиссионного тока достаточно для поддержания дугового разряда только при применении в качестве катода вольфрама, графита и других тугоплавких материалов. В сварочных дугах с плавящимся электродом, например с железным катодом ($T_{кип}$ = 3013 К), термоэмиссионного тока недостаточно для дугового разряда.

При сварке плавящимся электродом применение активированной проволоки также может способствовать повышению стабильности дуги. При наличии в проволоке в небольшом количестве рубидия, цезия, кальция, бария и других элементов удается осуществить устойчивый процесс в среде защитных газов даже на переменном токе.

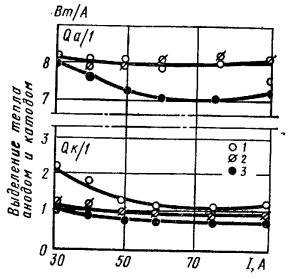


Рис. 47. Выделение тепла T, Вт/А анодом и катодом при нулевой длине дуги:

1 и *2* — чистый вольфрам ⌀ 3,2 и 1,6 мм; *3* — торированный вольфрам ⌀ 3,2 мм

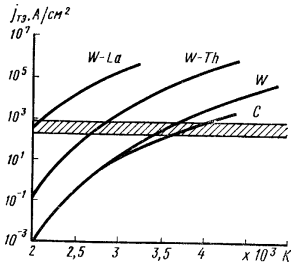


Рис. 48. Зависимость плотности термоэмиссионного тока от температуры:

W — вольфрамовый электрод; С — угольный электрод

Анодная зона дугового пространства имеет большую протяженность и меньшую напряженность поля по сравнению с катодной. В этой зоне имеет место чисто электронный ток, так как отрицательных ионов в плазме немного и скорость их небольшая.

Анодное падение напряжения в дуге с плавящимся электродом 1,5 —3,0 В, а в дуге с вольфрамовым электродом в среде аргона при силе тока 30—200 А оно составляет 5—7 В.

Металлургические особенности газовой защиты. *Свойства защитных газов.* По отношению к свариваемому металлу защитные газы могут быть активными или нейтральными, в зависимости от того, взаимодействуют они с металлом или нет. Например, азот, будучи активным по отношению к железу и хрому, оказывается нейтральным при сварке меди и кобальта.

Практически полностью нейтральными по отношению ко всем свариваемым металлам являются инертные одноатомные газы.

Защитный газ выбирают с учетом особенностей свариваемого металла, а также требований, предъявляемых к сварным швам.

Инертные газы применяют для сварки химически активных металлов, а также во всех случаях, когда необходимо получать сварные швы, однородные по составу с основным и присадочным металлом.

Активные газы применяют, когда заданные свойства металла можно обеспечить металлургической обработкой (окислением, восстановлением, азотированием и т. д.).

Физические свойства защитных газов приведены в табл. 23.

23. Физические свойства газов

Газ	Относительная атомная масса	Относительная молекулярная масса	Плотность при 0 °С и 760 мм рт. ст. 10^3	Температура кипения, °С	Коэффициент теплопроводности, кал/(см · с · °С)	Удельная теплоемкость при 0 °С, кал/(г · °С)
Ar	39,948	—	1,7833	−185,5	0,378 · 10^{-4}	0,125
He	4,003	—	0,17847	−268,9	3,32 · 10^{-4}	1,251
H	1,008	2,016	0,08988	−259	4,72 · 10^{-4}	3,40
N	14,008	28,016	1,251	−196	0,580 · 10^{-4}	0,248
O	15,999	31,998	1,429	−183	0,624 · 10^{-4}	0,219
CO_2	—	44,009	1,977	−78,9	0,380 · 10^{-4}	0,196

В ряде случаев целесообразно применять смесь инертных газов с активными, чтобы повысить устойчивость дуги, увеличить глубину проплавления, улучшить формирование шва, уменьшить разбрызгивание, повысить плотность металла шва, воздействовать на перенос металла в дуге, повысить производительность сварки. Существенное значение при выборе состава защитного газа имеют экономические соображения.

Смеси газов. Смесь Ar + (1—5% O_2). Примесь кислорода к аргону понижает критический ток, при котором капельный перенос металла переходит в струйный, способствует получению более плотного наплавленного металла, улучшает сплавление уменьшает подрезы и увеличивает производительность сварки. Аргонокислородную смесь применяют для сварки низкоуглеродистой и легированной стали.

Смесь Ar + (10—20% CO_2). Углекислый газ при сварке малоуглеродистой и низколегированной стали способствует устранению пористости в сварных швах; добавка CO_2 к аргону повышает стабильность дуги и улучшает формирование шва при сварке тонколистовой стали.

Тройная смесь 75% Ar — 20% CO_2 — 5% O_2 обеспечивает высокую стабильность дуги с плавящимся электродом при сварке стали, минимальное разбрызгивание металла, хорошее формирование шва, отсутствие пористости.

Смесь Ar + (10—30% N_2). Добавка N_2 к Ar способствует повышению проплавляющей способности дуги. Смесь применяют при сварке меди, а также аустенитной нержавеющей стали некоторых марок.

Смесь 80% CO_2 + 20% O_2 отличается высокой окислительной способностью, благодаря чему увеличивается слой шлака по сравнению со сваркой в CO_2. Смесь обеспечивает глубокое проплавление, хорошее формирование шва, минимальное разбрызгивание, высокую плотность металла шва. Ее применяют для сварки малоуглеродистой и низколегированной стали.

При отсутствии готовых газовых смесей смешение газов можно осуществлять на сварочном посту по схеме, показанной на рис. 49.

Состав смеси, подаваемой в горелку, регулируется изменением расхода газов, входящих в смесь. Расход каждого газа регулируется отдельным редуктором и измеряется ротаметром типа РС-3. При концентрации примешиваемого газа не выше 10% расход его следует измерять ротаметром РС-3А с эбонитовым поплавком. Каждый ротаметр должен быть снабжен графиком «расход — деле-

ние шкалы». Графики строят для каждого газа путем пересчета характеристики ротаметра, определяемой заводом-изготовителем применительно к воздуху при 0 ат. Пересчет производят по формуле

$$Q_1 = Q_0 \sqrt{\frac{p_1}{p}} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_1}},$$

где Q_1 — расход используемого газа, л/мин; Q_0 — расход воздуха, л/мин, при 0 ати для данного ротаметра (по паспорту для каждого деления используемого ротаметра); p_1 — рабочее давление (заданное), кгс/см²; p — давление воздуха, равное 1 ат (давление при тарировании ротаметра); γ — плотность воздуха при 20° С; γ_1 — плотность используемого газа.

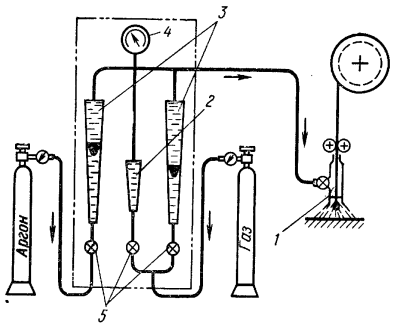


Рис. 49. Схема питания горелки газовой смесью:

1 — сварочная горелка; *2* — ротаметр РС-3А; *3* — ротаметры РС-3; *4* — манометр 0—2 ат; *5* — вентили

Взаимодействие газов с металлами. Процессы при сварке в инертных газах. Инертные газы аргон и гелий практически не взаимодействуют с металлами. Однако свариваемый металл может поглощать примеси инертного газа: кислород, азот, водород и др. Интенсивность растворения или образования химических соединений зависит от парциального давления газа над сварочной ванной. Например, сопоставление парциального давления кислорода в аргоне I-го сорта по ГОСТ 10157—73, содержащем 0,003% O_2, с упругостью диссоциации окислов металлов (рис. 50) показывает, что при сварочной температуре в аргоне промышленной чистоты могут диссоциировать только окислы меди, никеля, кобальта, вольфрама. Остальные металлы окисляются. На практике же благодаря непродолжительному времени пребывания металла в расплавленном состоянии, а также из-за небольшой скорости струи защитного газа абсолютное количество кислорода, вступающего в реакцию с расплавленным металлом, оказывается незначительным.

При наличии в металле легкоиспаряющихся элементов парциальное давление примесей активных газов атмосферы дуги соответственно снижается.

Большинство окислов металлов не растворяется в металле и выделяется на поверхности сварочной ванны в виде шлака. Закись железа FeO растворима в жидком металле.

При сварке стали растворившийся кислород может реагировать с примесями в металле с образованием шлаков и газов

$$[FeO] + [C,\ Si,\ Mn,\ S,\ H \text{ и др.}] \rightleftarrows (SiO_2,\ MnO \text{ и др.}) + \{CO,\ SO_2,\ H_2O\} + Fe$$

(элементы в квадратных скобках растворены в металле). Выделяющиеся при этом газы при кристаллизации сварочной ванны могут вызвать пористость в шве.

Азот в условиях сварки при взаимодействии с металлом может образовывать нерастворимые нитриды (например, TiN) или растворяться в металле шва.

Вследствие ограниченной растворимости в твердом металле азот при затвердевании сварочной ванны может образовывать поры. Растворенный азот может быть причиной снижения пластических свойств. В присутствии кислорода поглощение азота металлом усиливается.

Водород растворяется в жидком металле и может быть причиной пористости в шве. При определенных условиях водород снижает пластические свойства и способствует образованию трещин. Одним из источников выделения водорода является влага. Кислород, фтор и хлор образуют с водородом соединения, нерастворимые в жидком металле (OH, HF, HCl и др.), и поэтому способствуют уменьшению поглощения водорода металлом шва.

Важную роль в металлургическом процессе при сварке имеет испарение. Интенсивность испарения увеличивается с повышением температуры. При температуре сварочной ванны упругость паров металлов при сварке стали порядка 1,2—2,8 мм рт. ст. При температуре электродных капель упругость паров металла может достигать 80—110 мм рт. ст. Такой поток пара может положительно влиять на защиту металла от взаимодействия с газами.

Интенсивность взаимодействия электродного и основного металла с газовой атмосферой различная. Поэтому содержание элементов в металле шва оценивают следующим образом:

$$C_ш = \mu_п m C_п + \mu_о n C_о,$$

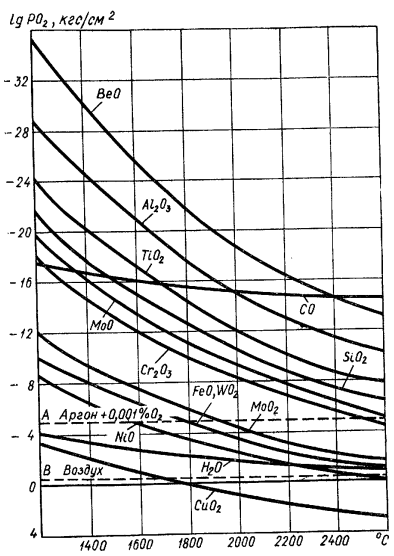


Рис. 50. Упругость диссоциации окислов элементов в зависимости от температуры

где $\mu_п$, $\mu_о$ — коэффициенты усвоения элементов соответственно из электродной проволоки и основного металла (определяются экспериментально); m и n — доли электродного и основного металла; $C_п$ и $C_о$ — содержание элемента в проволоке и в основном металле, %.

Процессы при сварке в углекислом газе. В зоне сварки при высокой температуре углекислый газ диссоциирует:

$$CO_2 \rightarrow CO + 1/2O_2.$$

В связи с увеличением степени диссоциации CO_2 с повышением температуры состав газовой фазы над сварочной ванной зависит от температуры в данном участке (рис. 51).

Выделяющийся при диссоциации CO_2 кислород окисляет жидкий металл с образованием закиси железа FeO, растворимой в жидком металле, и ряда нерастворимых окислов элементов, входящих в состав металла (SiO_2, MnO, AlO_3 и др.).

24. Коэффициенты усвоения элементов из проволоки $\mu_п$ и из основного металла $\mu_о$ в углекислом газе ($d_э$ = 2 мм, обратная полярность)

Сталь	Проволока	Элемент	Коэффициент усвоения элементов		
			$\mu_п$	$\mu_о$	общий μ
Ст3	Св-08ГС	C Mn Si	0,51 0,35 0,23	0,86 0,85 0,73	0,71 0,53 0,37
30ХГСА	Св-18ХГСА	C Mn Si Cr	0,55 0,64 0,69 0,89	0,92 0,93 0,97 0,97	0,70 0,80 0,81 0,94
12Х18Н9Т	Св-06Х19Н9Т	C Mn Si Cr Ti	0,92 0,60 0,73 0,89 0,20	1,0 1,0 0,81 0,98 0,78	0,96 0,78 0,78 0,94 0,42

При взаимодействии с углеродом образуется нерастворимая в металле окись углерода CO по следующей схеме:

$$CO_2 = CO + 1/2O_2;$$
$$1/2O_2 + Fe = (FeO) \rightarrow [FeO];$$
$$\frac{[FeO] + [C] = CO + Fe}{CO_2 + [C] = 2CO}$$

(элементы и соединения в квадратных скобках растворены в металле).

Окислительная способность углекислого газа по отношению к углероду растет с повышением температуры. Однако при температуре кристаллизации реакцию окисления углерода можно затормозить за счет добавки к стали элементов раскислителей (Si, Mn, Ti, Al и др.).

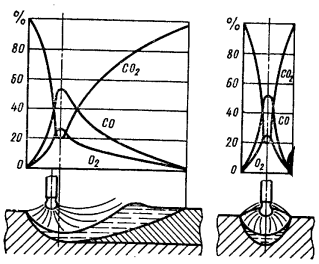


Рис. 51. Ориентировочная схема изменения состава газа (%), соприкасающегося с металлом сварочной ванны, при сварке в CO_2

Для предотвращения образования пор при сварке углеродистой и легированной стали применяют электродную проволоку с элементами-раскислителями: Св-10ХГ2С, Св-08ХГ2СМ, Св-08Х14ГТ, Св-08ГСМТ и др. (по ГОСТ 2246—70), В силу различных условий (температуры, поверхности и интенсивности перемешивания металла) коэффициент усвоения из проволоки меньше, чем из основного металла (табл. 24).

Окислительная способность углекислого газа, оцениваемая количеством прореагировавшего кислорода, отнесенным к единице металла, эквивалентна окислительной способности

смесей Ar + 21,5% O_2 — в дуге при переходе электродного металла в ванну, Ar + 11% O_2 — в сварочной ванне и Ar + 15,4% O_2 — в общем процессе. Углекислый газ по сравнению с кислородом более интенсивно окисляет металл в дуге и менее интенсивно в сварочной ванне. Коэффициент усвоения легирующих элементов плавящихся электродов при сварке в смесях Ar + CO_2 и Ar + O_2 уменьшается при уменьшении содержания Ar (рис. 52 и 53). При сварке в смесях CO_2 + O_2 коэффициент усвоения элементов уменьшается при увеличении доли O_2 (рис. 54). Усвоение швом элементов зависит от режима

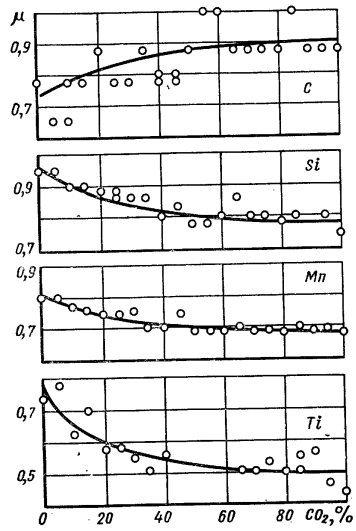


Рис. 52. Влияние состава смеси Ar + CO_2 на общие коэффициенты μ усвоения легирующих элементов

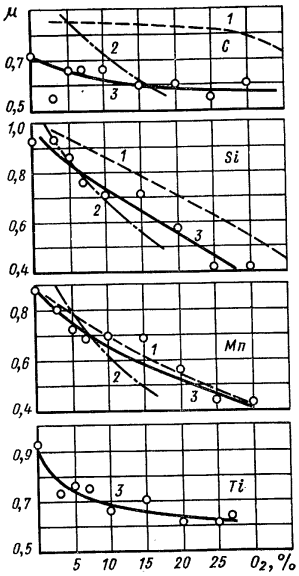


Рис. 53. Влияние состава смеси Ar + O_2 на общие коэффициенты μ усвоения легирующих элементов:

1 — электрод Св-18ХГСА (⌀ 2 мм, $I_{св}$ = 260 ÷ 270 А; $U_д$ = 27 ÷ 29 В); *2* — электрод Св-08ХГ2СМ (⌀ 1 мм; $I_{св}$ = 240 ÷ 260 А; $v_{св}$ = 10 ÷ 15 м/ч); *3* — электрод Св-08ГСМТ (⌀ 1,2 мм; $I_{св}$ = 200 А; $U_д$ = 23 В; $v_{св}$ = 18 м/ч)

сварки: с повышением напряжения на дуге и уменьшением тока потери углерода, кремния и марганца увеличиваются.

Способы газовой защиты. *Сварка со струйной защитой шва.* Эффективность газовой защиты при дуговой сварке зависит от параметров струи, а также от интенсивности воздействия возмущающих факторов. На параметры струи газа влияют конструкция и размеры сопла горелки, расход защитного газа и расположение горелки относительно изделия. Интенсивность воздействия возмущающих факторов обусловливается режимом сварки и потоками окружающего воздуха.

Струю защитного газа, истекающую из сопла горелки (рис. 55), можно представить в виде осесимметричного активного газового потока в пассивную (неподвижную) среду (затопленная струя). Потенциальное ядро струи конической формы представляет собой зону 100%-ной концентрации защитного газа. Участок

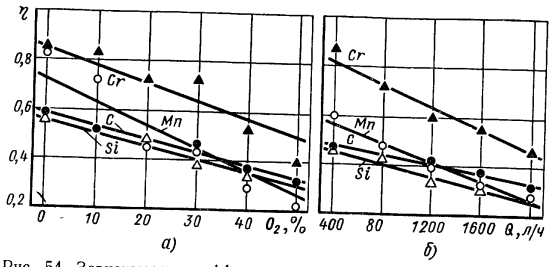


Рис. 54. Зависимость коэффициента перехода элементов от содержания O_2 в смеси CO_2—O_2 (*а*) и расхода смеси (*б*). Проволока Св-18ХГСА

от среза сопла до точки, в которой пограничный слой смыкается, называется начальным. Остальная часть струи, следующая за начальным, называется основным участком струи.

При степени турбулентности (отношение пульсации скорости к средней величине) $\varepsilon = 1 \div 2\%$ длина начального участка равна четырем диаметрам сопла. С увеличением ε длина начального участка уменьшается.

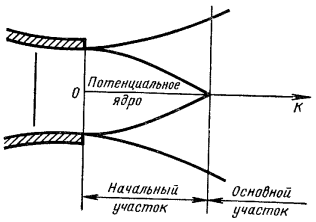


Рис. 55. Схема истечения струи газа из сопла

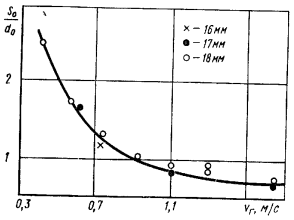


Рис. 56. Зависимость длины начального участка струи от скорости истечения газа

На рис. 56 представлена зависимость длины начального участка струи s_0 от скорости истечения газа, определенная экспериментально с цилиндрическими соплами. Эта зависимость может быть выражена эмпирической формулой

$$\frac{s_0}{d_0} = \frac{1}{v_г},$$

где d_0 — диаметр сопла; $v_г$ — скорость истечения газа м/с.

Защиту сварочной ванны при сварке активных металлов (титан, цирконий, молибден и др.) и сплавов на их основе необходимо осуществлять потенциальным

ядром струи. При сварке неактивных металлов зону сварки можно защищать пограничным слоем струи или ее основным участком. В этом случае атмосфера дуги представляет собой смесь защитного газа с воздухом.

При натекании на поверхность свариваемого изделия начальный участок струи деформируется. Для ориентировочной оценки диаметра зоны газовой защиты при аргонодуговой сварке можно воспользоваться формулой

$$d_э = 0{,}33 d_c \left(5{,}3 - \frac{h}{d_c}\right),$$

где d_c — диаметр сопла; h — расстояние между соплом и изделием

Благодаря деформации струи газа при натекании на поверхность изделия существенно увеличивается сечение потенциального ядра, что приводит к расширению зоны защиты при расстоянии сопла от изделия, соизмеримом с диаметром сопла.

В реальных условиях сварки струя защитного газа подвергается возмущающему действию дуги и конвективных потоков газа. Поэтому характер газовых струй и их защитные свойства изучают экспериментально с использованием специальных методик.

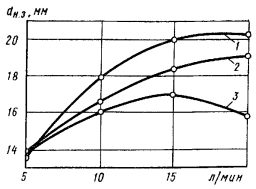


Рис. 57. Зависимость диаметра $d_{н.з}$ неокисленной зоны катодного распыления (мм) от расхода аргона (л/мин) при разных сварочных токах:

1) I = 75 А; t = 3,8 с; *2*) I = 100 А; t = 2,6 с; *3*) I = 130 А; t = 2,1 с. Диаметр сопла 16 мм; расстояние от сопла до свариваемого изделия 10 мм

Для большинства случаев сварки с применением защитных сопл диаметром до 20—25 мм величина неокисленной зоны катодного распыления может служить

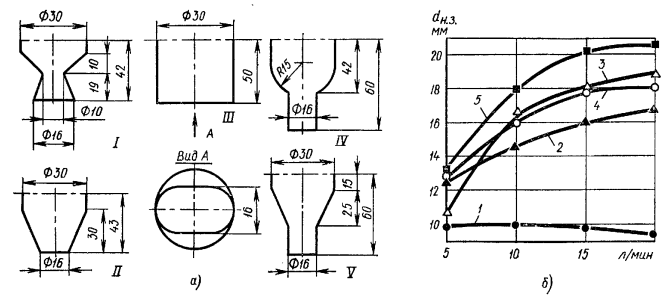


Рис. 58. Формы *I*—*V* сопл (*а*) и соответствующие им неокисленные зоны (*1*—*5*) катодного распыления (мм) при разных расходах аргона (*б*), л/мин

количественной характеристикой защитных свойств струи аргона. На рис. 57 показана зависимость величины неокисленной зоны катодного распыления от расхода аргона при разных сварочных токах.

Сравнительные данные защитных свойств струи при разных формах сопл приведены на рис. 58. Наихудшими свойствами обладают диффузорные сопла *I*; пониженные защитные свойства и у конфузорных сопл *II*, *III*, а цилиндрические сопла *IV* и *V* способствуют образованию на стенках ламинарного слоя, который

переходит в ламинарный пограничный слой начального участка струи. Благодаря этому защитные свойства струи существенно повышаются. Переход от конической к цилиндрической части должен быть плавным. Недопустимы скругления и дефекты внутренней кромки среза сопла.

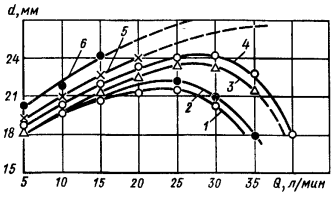


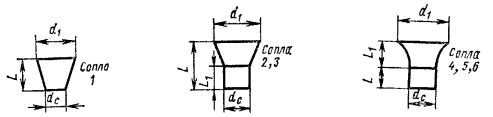
Рис. 59. Зависимость диаметра d неокисленной зоны от расхода аргона Q при расстоянии горелки от изделия 16 мм (номера кривых см. табл. 25)

При повышении расхода газа выше определенной величины поток газа турбулизуется, смешивается с окружающим воздухом, защитные свойства ухудшаются. Струя газа при повышенном расходе оказывается более устойчивой, если применять сопло сложной формы, состоящее из цилиндрической части и конфузора с образующей в виде параболической кривой, в частности кривой Витошинского (рис. 59, табл. 25).

На защитные свойства струи влияет способ ввода газа в сопло. При вводе газа через крупные отверстия струями, параллельными оси электрода, повышается масштаб турбулентности и увеличивается неоднородность поля скоростей. Защитные характеристики значительно улучшаются, если газ вводить через мелкие отверстия, тонкими струями, направленными на стенки сопла или специальные отражатели.

Гашение турбулентности в потоке газа на входе в сопло осуществляется при применении металлических сеток с числом отверстий 80—250 на 1 см². Применяется пакет. При этом происходит перевод крупномасштабной турбулентности

25. Характеристика сопл



№ сопла	Профиль сопла	Размеры, мм				Коэффициент поджатия, d_1^2/d_c^2
		d_c	d_1	L	L_1	
1	Конический	16	30	37	—	—
2	Конический с цилиндрической частью на выход		27	6		
3			26	37	16	
4	По кривой Витошинского		36	16		
5			28		4	5
6			36	32		3 5

в потоке до сетки в мелкомасштабную, пропорциональную размеру ячейки. Уменьшению турбулентности способствует повышение аэродинамического сопротивления, что достигается установкой двух-четырех сеток на расстоянии друг от друга, превышающем 15 диаметров проволоки сетки.

Недостатком металлической сетки является относительно низкая стойкость, быстрое выгорание при сварке. Этого недостатка лишены керамические пластинки (газовые линзы). Оптимальная толщина керамической линзы 2—3 мм. С увеличением пористости керамики защитные свойства струи повышаются (рис. 60). Эффективная защита при применении керамических линз может быть на расстоянии до 25—30 мм от сопла изделия. При сварке на ветру струя защитного

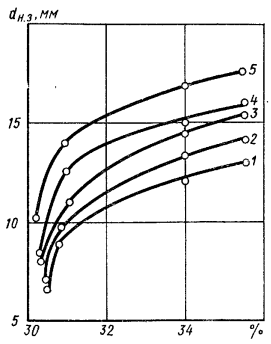


Рис. 60. Зависимость эффективности газовой защиты от пористости (%) материала линзы при разных расходах аргона:

1 — 4 л/мин; *2* — 5 л/мин; *3* — 7 л/мин; *4* — 9 л/мин; *5* — 15 л/мин; расстояние от сопла 15 мм

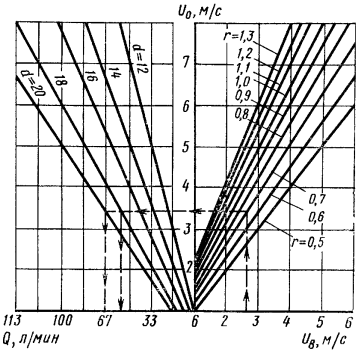


Рис. 61. Номограмма для определения необходимого расхода углекислого газа при сварке на ветру

газа деформируется, защищаемое пятно на изделии смещается в направлении ветра. Для улучшения защиты зоны сварки рекомендуется увеличивать расход защитного газа, уменьшать зазор между соплом и свариваемым изделием, а также принять меры к уменьшению воздействия ветра (защита зоны сварки сетчатыми колпаками или подвижными микрокамерами, установка ветроотбойных экранов, применение дополнительных газовых веерных струй).

При сварке на ветру неактивных металлов с применением в качестве защитной среды углекислого газа и с использованием цилиндрических сопл расход газа можно определять по номограмме (рис. 61).

При сварке активных металлов, когда защита осуществляется потенциальным ядром струи, необходимо применять конфузорное сопло с цилиндрическим окончанием, образующая которого выполнена по параболической кривой, в частности по кривой Витошинского, а перед соплом устанавливать газовую линзу или мелкоячеистую сетку.

Ориентировочные данные для подсчета расхода аргона на 1 м шва при сварке в нормальных цеховых условиях без сносящих потоков приведены в табл. 26 и 27.

При нормировании расхода газа следует учитывать расход в количестве 15% на продувку газопровода перед началом работы, на неиспользуемый остаток

в баллоне (3—4 ат), на сварку контрольных образцов и на подварку дефектов сварных швов.

При выполнении коротких швов (< 50 мм) и при сварке арматуры диаметром < 20 мм данные табл. 26 и 27 необходимо умножать на коэффициент 1,2. Расход газа на прихватку составляет примерно 0,2 от общего расхода газа на сварку.

26. Расход аргона для соединений встык и внахлестку при сварке вольфрамовым электродом

Свариваемый материал	Толщина, мм	Расход аргона, л/мин (только на сварку)	Расход, л, на 1 м шва при скорости сварки, м/ч								
			ручной				механизированной				
			4	6	10	15	10	15	20	25	30
Алюминиевые сплавы	1	6	90	60	36	24	36	24	18	15	12
	1,5—3,0	7	105	70	42	28	42	28	21	17	14
	⩾ 5	15	225	150	90	60	90	60	45	36	30
Магниевые сплавы	1	7	105	70	42	28	42	28	21	17	14
	3	10	150	100	60	40	60	40	30	24	20
	⩾ 5	18	270	180	108	72	108	72	54	42	36
Низко- и среднелегированная сталь	1	5	75	50	30	20	30	20	15	12	10
	3	8	120	80	48	32	48	32	24	19	16
Коррозионно-стойкие стали	0,5	3	45	30	18	12	18	12	9	7	6
	0,8—1,0	4	60	40	24	16	24	16	12	10	8
	1,2—1,5	6	90	60	36	24	36	24	18	15	12
	2,0—3,0	8	120	80	48	32	48	32	24	19	16
Титановые сплавы	0,5	5	75	50	30	20	30	20	15	12	10
	1,0	6	90	60	36	24	36	24	18	15	12
	1,5—3,0	7	105	70	42	28	42	28	21	17	14

27. Расход аргона для соединений встык и внахлестку при сварке плавящимся электродом

Свариваемый материал	Толщина, мм	Расход аргона, л/мин (только на сварку)	Расход, л, на 1 м шва при скорости сварки, м/ч								
			15	20	25	30	40	50	60	75	90
Алюминиевые сплавы	2—5	8	32	24	19	16	12	96	8	10	10
	6—8	10	40	30	24	20	16	13	13	12	11
	10	13	52	39	31	26	22	18	17	14	14
	⩾ 12	15	60	45	36	30	25	20	19	17	16
Магниевые сплавы	2—5	8	32	24	19	16	12	10	10	10	10
	6—8	10	40	30	24	20	15	14	13	12	11
	10	13	52	39	31	26	20	19	17	14	14
	⩾ 12	15	60	45	36	30	25	22	19	17	16
Коррозионно-стойкие стали	2—3	6	—	18	—	12	9	8	8	7	6
	4—5	8	—	24	—	—	13	12	10	10	10
	6—8	10	—	30	—	—	16	14	13	12	11
	10	12	—	36	—	24	20	17	15	14	13

Расход гелия рекомендуется определять по нормативам на расход аргона, вводя поправочный коэффициент 1,3.

Расход газа одним постом за рабочую смену можно ориентировочно определить по формуле

$$V = k\eta t q,$$

где q — часовой расход газа; t — продолжительность рабочей смены; η — коэффициент использования поста (при ручной сварке); $k = 1{,}15$ — коэффициент,

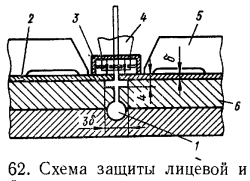


Рис. 62. Схема защиты лицевой и обратной сторон соединения при механизированной аргонодуговой сварке титана и его сплавов:

1 — канал для аргона, сообщающийся с канавкой в подкладке; *2* — свариваемые листы титана; *3* — защитный колпак-приставка; *4* — сопло сварочной горелки; *5* — прижимы приспособления; *6* — приспособление

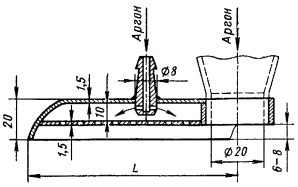


Рис. 63. Продольный разрез защитного колпака, изображенного на рис. 62

учитывающий дополнительный расход газа на продувку шлангов и горелки до и после сварки.

При сварке высокоактивных металлов (титан, цирконий, тантал, ниобий, молибден) необходимо защищать зону металла, нагретую до температуры > 300° С. Для расширения зоны струйной защиты применяют дополнительные колпаки-приставки (рис. 62, 63).

Защиту обратной стороны шва осуществляют поджатием кромок свариваемого металла к металлической подкладке (медной, стальной, алюминиевой), к флюсовой подушке из безкислородного флюса, подачей инертного газа, например аргона, ~ 4—6 л/мин в специальную подкладку с отверстиями, расположенными вдоль стыка, или подкладку, изготовленную из пористого металла. При сварке замкнутых сосудов защиту обратной стороны шва осуществляют пропусканием инертного газа внутрь сосуда.

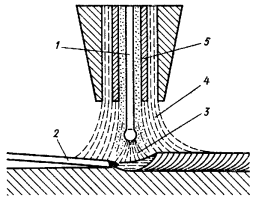


Рис. 64. Схема дуговой сварки с комбинированной защитой:

1 — электрод; *2* — присадочный металл; *3* — сварочная дуга; *4* — углекислый газ; *5* — аргон

Комбинированная струйная защита. В ряде случаев с целью экономии инертных газов, а также для получения оптимальных технологических и металлургических свойств защитной среды применяют горелки, конструкция которых обеспечивает защиту двумя концентрическими потоками газов (рис. 64). Внутренний поток образуется аргоном или гелием, а наружный — более дешевыми азотом или углекислым газом.

Сварка в контролируемой атмосфере. Наиболее эффективная защита металла шва и околошовной зоны обеспечивается при сварке в камерах с контролируемой атмосферой.

Жесткие местные камеры для защиты части свариваемого изделия применяют главным образом при сварке крупногабаритных изделий. Заполнение камеры инертным газом осуществляется предварительной продувкой. Во время сварки газ непрерывно подается в камеру для обновления защитной атмосферы и предупреждения подсоса воздуха.

Мягкие камеры, представляющие собой мешок из баллонной ткани или прозрачных пленочных материалов. На время сварки в камере поддерживается избыточное давление $\sim 0{,}1$ ат. Сварку выполняют вручную с помощью герметичных перчаток. При применении специальных рукавов-экономизаторов можно многократно использовать инертный газ, перегоняя его в экономизатор на время загрузки и выгрузки деталей.

Эластичные камеры представляют собой оболочку из вакуумной резины с жесткими подвижными кольцами-каркасами. Перед заполнением инертным газом камера сжимается до минимального объема и вакуумируется вакуумным насосом. Сварку производят при избыточном давлении до 0,1 ат.

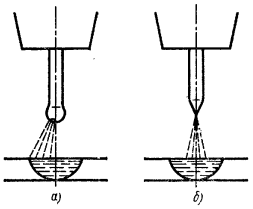


Рис. 65. Концы электродов при горении дуги в среде инертных газов:

а — электрод из чистого вольфрама; *б* — электрод из вольфрама с активирующей присадкой

Жесткие камеры представляют собой наиболее эффективное средство общей защиты свариваемого изделия при ручной и механизированной сварке. Перед заполнением камеру вакуумируют до 10^{-4} мм рт. ст., а затем наполняют аргоном до избыточного давления 0,05—0,1 ат. Ручную сварку осуществляют посредством специальных герметичных перчаток, вмонтированных в стенки камеры. Механизированную сварку производят при дистанционном управлении.

Обитаемые камеры применяют для сварки сложных крупногабаритных дорогостоящих изделий. Сварщик-оператор в этом случае работает внутри камеры, заполненной инертным газом. Для защиты оператора, обеспечения его жизнедеятельности применяют специальный скафандр.

В установках для сварки с контролируемой атмосферой, не оснащенных системами очистки аргона, качественная атмосфера может быть получена в камерах с предварительным вакуумированием. Однако состав атмосферы в камере с течением времени изменяется за счет десорбции и диффузии газов и паров с внутренних поверхностей, а также в результате переплава основного и присадочного материалов в процессе сварки.

Работоспособность атмосферы сварочной камеры измеряется с момента напуска защитного газа в камеру до момента достижения предела допустимой концентрации примесей O_2, N_2, H_2 или H_2O.

Сварка неплавящимся электродом. Источником тепла является дуга, возбуждаемая между вольфрамовым или угольным электродом и изделием. Этот процесс предназначен главным образом для материалов толщиной < 3—4 мм. Однако при использовании различных средств повышения проплавляющей способности и стабильности дуги и некоторых технологических мероприятий область применения может быть значительно расширена.

Способы повышения стабильности процесса сварки. *Применение активированных электродов.* При относительно высокой стабильности разряда дуга постоянного тока прямой полярности может отклоняться от оси электрода (рис. 65, *а*) из-за блуждания катодного пятна по поверхности конца электрода, а также в результате взаимодействия с внешним магнитным полем или из-за химической неоднородности поверхности анода.

При применении вольфрамовых электродов, активированных окислами тория (ThO_2), лантана (La_2O_3), иттрия (Y_2O_3) и других элементов с малой работой

выхода электрона, блуждание катодного пятна отсутствует (рис. 65, *б*), повышается общая устойчивость дуги, заточенный конец не оплавляется, а при отсутствии коротких замыканий на ванну практически исключается вероятность засорения шва вольфрамовыми включениями.

В состав вольфрамового электрода обычно вводят 1,5—3,0% окислов активирующих элементов. При длительной работе электрода активирующие элементы при высокой температуре в зоне активного пятна испаряются интенсивнее вольфрама. Поступление новых порций активирующих элементов происходит за счет диффузии в твердом вольфраме из глубинных слоев.

Коэффициент диффузии иттрия на два порядка выше, чем коэффициент тория и лантанидов. Поэтому иттрий, благодаря интенсивной диффузии, способен длительное время поддерживать необходимую концентрацию в зоне активного пятна. Вольфрамовые электроды с присадкой иттрия оказываются наиболее стойкими. Их расход на 1 м шва значительно меньше, чем лантанированных вольфрамовых электродов.

Активированные вольфрамовые электроды выдерживают больший ток по сравнению с электродами из чистого вольфрама. Наибольший эффект в повышении допустимого тока обеспечивает присадка 2,5—3% Y_2O_3 (рис. 66 и 67).

В качестве электродов для сварки применяют следующие вольфрамовые прутки, выпускаемые промышленностью: вольфрам чистый (ВЧ) по ТУ 48-19-39—73; вольфрам торированный (ВТ15) по ТУ 11 Яе 0.021.056—72; вольфрам лантанированный (ВЛ) по ТУ 48-19-27—72; вольфрам иттрированный (ВИ30) по ТУ 11 СУ.021.099—72.

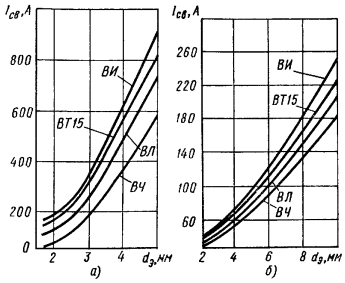


Рис. 66. Допустимые значения постоянного тока для электродов различных марок:

ВИ — иттрированного; ВТ15 — торированного; ВЛ — лантанированного; ВЧ — чистого; *а* — постоянный ток прямой полярности; *б* — постоянный ток обратной полярности

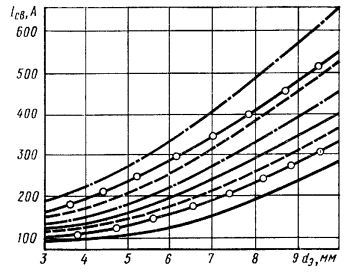


Рис. 67. Допустимые значения переменного тока без постоянной составляющей:

— · — ВИ; — ○ — ВТ15; — — — — ВЛ, — ВЧ (верхняя линия — максимальные значения, нижняя — минимальные)

Обеспечение энергетической устойчивости горения дуги. Помимо физических условий (свойства электрода, состав среды и т. д.), устойчивость дуги зависит от свойств источника питания и параметров электрической цепи.

Способность энергетической системы (источник—дуга) поддерживать длительное непрерывное горение дуги при возможных колебаниях ее параметров (длины, тока и напряжения) принято называть энергетической устойчивостью горения дуги.

Дуга с неплавящимся вольфрамовым электродом в процессе сварки по различным причинам может изменяться по длине. Для обеспечения постоянства проплавляющей способности дуги, т. е. для устойчивости режима при изменении длины дуги, необходимо соответствующее изменение силы тока.

При сварке от источников питания без регуляторов желательна крутопадающая характеристика источника, обеспечивающая наиболее стабильное проплавление основного металла.

Однако наибольшая стабильность проплавления основного металла и формирования шва может быть достигнута при применении источников с регуляторами, построенных на базе полупроводниковых триодов или тиристоров.

Использование саморегулирования по скрытой составляющей длины дуги. При сварке материалов со сквозным проплавлением расплавленный металл под действием веса, давления дуги и поверхностного натяжения деформируется с образованием вогнутого мениска (рис. 68, *а*). При этом общая длина дуги увеличи-

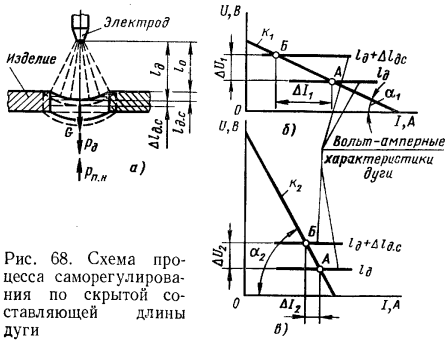


Рис. 68. Схема процесса саморегулирования по скрытой составляющей длины дуги

вается на величину $\Delta l_{д.с}$ (на скрытую составляющую). В соответствии с этим изменяется режим сварки: рабочая точка A, представляющая собой пересечение вольт-амперной характеристики дуги со статической характеристикой источника, смещается в точку $Б$ (рис. 68, *б* и *в*). При падающей внешней характеристике источника удлинение дуги на $\Delta l_{д.с}$ вызывает уменьшение тока на ΔI, что, в свою очередь, приводит к уменьшению $\Delta l_{д.с}$. Таким образом, имеет место саморегулирование по скрытой составляющей длины дуги. При одном и том же удлинении дуги изменение тока при пологопадающей характеристике (ΔI_1) больше, чем при крутопадающей (ΔI_2). Следовательно, с уменьшением угла наклона внешней статической характеристики источника интенсивность саморегулирования растет.

Это свойство саморегулирования рекомендуется использовать при сварке металлов со сквозным проплавлением, когда имеет место провисание сварочной ванны. Однако следует иметь в виду, что успешное использование источников с пологопадающей внешней характеристикой возможно лишь при защите от колебаний напряжения питающей сети и стабилизации внешней составляющей длины дуги.

Стабилизация дуги переменного тока. В те полупериоды, когда катодом является изделие (обратная полярность), напряжение возбуждения дуги относительно велико (рис. 69). Возбуждение дуги происходит с некоторым опозданием. Как только дуга возбудилась, напряжение падает до $U_д$ и сохраняется

таковым до смены обратной полярности на прямую. При прямой полярности дуга горит при меньшем напряжении.

Для обеспечения надежного повторного возбуждения дуги переменного тока при смене полярности требуется источник питания с повышенным напряжением холостого хода (на алюминиевых сплавах не менее 200 В, а на меди не менее 300 В).

На практике пользуются обычными трансформаторами, а для возбуждения дуги применяют генераторы импульсов высокого напряжения (стабилизаторы).

Вследствие значительного различия в свойствах вольфрамового электрода и свариваемого металла кривая напряжения дуги имеет несимметричную форму; в ней имеется постоянная составляющая, которая, в свою очередь, вызывает появление в сварочной цепи постоянной составляющей тока $I_{2п}$. Величина последней обусловливается суммарным омическим сопротивлением сварочной цепи.

Кривая сварочного тока выражается формулой

$$I_2 = -\frac{U_0}{r_2} + \sum_{k=1}^{\infty} B_к \sin(k\omega t + \beta k),$$

где U_0 — постоянная составляющая напряжения дуги; r_2 — омическое сопротивление сварочной цепи; $B_к$ и $\beta_к$ — амплитудные значения тока и фазы k-й гармоники; ω — угловая частота; t — время.

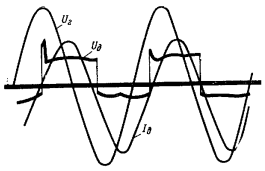


Рис. 69. Параметры дуги переменного тока при сварке вольфрамовым электродом в среде аргона

Постоянная составляющая сварочного тока создает постоянное магнитное поле в сердечнике трансформатора и дросселя. Это приводит к искажению формы кривой тока, уменьшению коэффициента мощности дуги и понижению устойчивости ее горения. При этом увеличивается ток холостого хода трансформатора, что приводит к неполному использованию его мощности.

Постоянная составляющая тока в сварочной цепи влияет на качество сварки алюминиевых сплавов. При сварке этих сплавов сварочная ванна даже при небольшом содержании O_2 и N_2 в аргоне оказывается покрытой тугоплавкой пленкой окислов и нитридов, препятствующих сплавлению кромок и хорошему формированию шва. При обратной полярности благодаря катодному распылению происходит разрушение окисной и нитридной пленок и, таким образом, улучшается сплавление кромок и формирование шва. Уменьшение тока в полупериоды обратной полярности, т. е. возникновение в цепи постоянной составляющей тока, приводит к загрязнению поверхности сварочной ванны, затруднению сплавления свариваемых кромок и ухудшению формирования шва.

При сварке возможно также полное выпрямление сварочного тока, когда из-за недостаточного напряжения источника питания дуга не возбуждается в полупериоды обратной полярности.

Полное выпрямление устраняется:

питанием дуги от трансформатора с напряжением холостого хода 200 В и выше;

питанием дуги от стандартного сварочного трансформатора с $U_{хх} = 60 \div 70$ В с наложением высокочастотного разряда от осциллятора;

питанием дуги от стандартного сварочного трансформатора с параллельным подключением генератора импульсов высокого напряжения 250—300 В (импульсы подаются синхронно со сменой полярности на обратную).

Частичное выпрямление уменьшается или полностью устраняется одним из следующих способов:

включением в сварочную цепь активного и индуктивного сопротивления; способ требует повышенного напряжения холостого хода и связан со значительными потерями энергии;

включением в сварочную цепь батарей неполярных конденсаторов (рис. 70, *а*), при этом емкость подбирается по максимальному току из расчета 300 мкФ на 1 А; преимуществом способа является отсутствие активных потерь, увеличение cos φ и улучшение условий эксплуатации трансформатора;

включением в сварочную цепь батареи аккумуляторов или генератора постоянного тока (рис. 70, *б*) с ЭДС, направленной встречно постоянной составляющей напряжения дуги; способ применяют редко, так как дополнительные источники постоянного тока усложняют эксплуатацию сварочного поста;

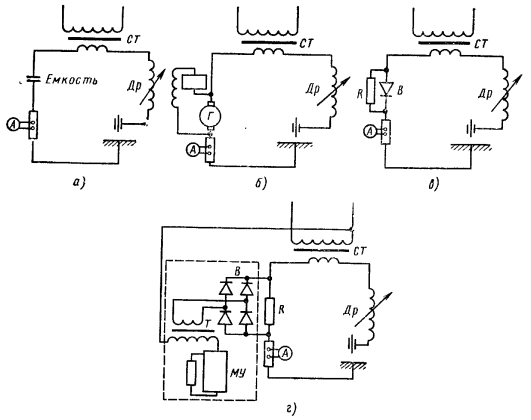


Рис. 70. Схемы питания дуги переменного тока при сварке вольфрамовым электродом

включением в сварочную цепь однополупериодного выпрямителя, зашунтированного сопротивлением (рис. 70, *в*); полупроводниковые вентили включают таким образом, чтобы они пропускали ток в полупериоды, когда катодом является изделие; способ подавления постоянной составляющей связан с потерями энергии на активное сопротивление, шунтирующее выпрямитель;

подключением параллельно активному сопротивлению управляемого полупроводникового выпрямителя, полярность которого обратна полярности напряжения, создаваемого постоянной составляющей на активном сопротивлении (рис. 70, *г*); величина активного сопротивления в этом случае сведена к минимуму, благодаря чему потери мощности на активном сопротивлении незначительны; в качестве активного сопротивления обычно используют водоохлаждаемую трубку из нержавеющей стали; полупроводниковый выпрямитель *В*, собранный по мостовой схеме, питается от понижающего трансформатора *Т*, в первичную обмотку которого включен магнитный усилитель *МУ*; такая схема позволяет регулировать в широких пределах величину постоянной составляющей и, таким образом, расширяет технологические возможности процесса сварки;

применением источников питания с тиристорным управлением. Тиристорные схемы обеспечивают получение любых соотношений между полупериодами прямой и обратной полярности.

Технологические мероприятия по повышению устойчивости горения дуги. Одной из причин отклонения и блуждания дуги может быть химическая неоднородность поверхности свариваемого металла. Например, при сварке среднелегированной стали дугой переменного тока, не склонной к взаимодействию с магнитным полем, наблюдается интенсивное блуждание дуги.

Присутствие на поверхности металла окислов приводит к увеличению плотности тока за счет уменьшения анодного пятна при прямой полярности или ограничения зоны перемещения катодного пятна при обратной полярности. Поэтому для предупреждения блуждания дуги необходима тщательная зачистка поверхности или равномерное оксидирование. При сварке по оксидированной поверхности дуга и формирование шва более стабильны.

Отклонение дуги наблюдается при сварке разнородных металлов, при этом возможности такого отклонения уменьшаются с повышением градиента потенциала столба дуги. Для повышения градиента столба следует применять защитные газы с высоким эффективным потенциалом ионизации (например, гелий или аргон с добавкой 5—10% водорода) или сжимать дугу охлаждаемым соплом или продольным магнитным полем.

Способы повышения проплавляющей способности дуги. Повышение проплавляющей способности дуги достигается за счет увеличения интенсивности теплового и силового воздействия ее на свариваемый металл. Увеличить сосредоточенность теплового потока дуги можно различными способами, которые сводятся к сжатию столба дуги и ограничению активного пятна на изделии.

Сварка по окисленной поверхности. Окислы на поверхности металла ограничивают размеры, а также возможность перемещения активного пятна. Например, при сварке стали типа 18-8, при переходе с чистой на окисленную поверхность металла увеличивается напряжение на дуге на 0,5—3 В в зависимости от режима сварки и параметров пленки.

При этом эффективный КПД возрастает на 10—15%, а эффективная мощность на 30—60%. Градиент падения напряжения в столбе дуги возрастает с 0,9—1,1 В/мм на чистой поверхности детали до 1,3—1,45 В/мм на окисленной.

Оптимальная толщина пленки 40—100 мкм. При толщине пленки < 20 мкм и > 220 мкм происходит блуждание дуги. Степень сжатия дуги тем больше, чем выше температура плавления окисной пленки (табл. 28).

28. Характеристика дугового разряда при наличии окисной пленки на поверхности металла

Материал анода (температура плавления, °С)	Пленка	Температура плавления пленки, °С	Напряжение дуги, В	Макроанодное пятно	
				Диаметр, см	Площадь, см²
12Х18Н10Т (1420)	Без пленки	—	10,2—10,5	0,61—0,73	0,035
	С пленкой 70% Fe_2O_3 и 30% $FeO \cdot Cr_2O_3$	1570	11,2—11,9	0,5—0,6	0,024
	Пленка SiO_2	1710	11,8—12,7	0,45—0,52	0,019
Сталь Ст 3 (1530)	Без пленки	—	10,4—10,6	0,72—0,8	0,046
	Пленка SiO_2	1710	12,0—12,8	0,58—0,82	0,028
	Пленка Al_2O_3	2050	13,1—14,0	0,53—0,57	0,024

При сварке стали 12Х18Н10Т толщиной 5—8 мм с оксидированной при 800° С поверхностью глубина проплавления увеличивается на 15—30%, а ширина сварочной ванны уменьшается на 25%. Наличие окисной пленки на поверх-

ности металла не оказывает заметного влияния на механические свойства соединения.

Сварка с применением флюса. Нанесением на поверхность свариваемого металла слоя флюса небольшой толщины (но не менее 0,2—0,25 мм), состоящего из галогенидов и некоторых окислов, можно существенно увеличить проплавляющую способность дуги и уменьшить, таким образом, коэффициент формы шва (отношение ширины шва к глубине). При этом благодаря увеличению концентрации тепловой энергии в активном пятне повышается эффективность проплавления и снижаются затраты погонной энергии при сварке.

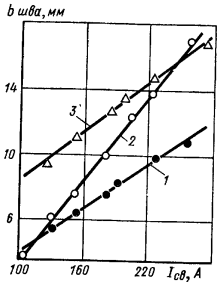


Рис. 71. Зависимость ширины шва *b* и обратного валика от сварочного тока:

1 — ширина шва, сварка с флюсом; *2* — ширина обратного валика, сварка с флюсом; *3* — ширина шва, сварка без флюса

В состав флюсов для сварки титана входят галогениды, для сварки стали — галогениды и окислы.

Для сварки титана применяют флюсы систем SrF_2—LiF(АНТ—15 А), CaF_2—MgF_2(АНТ—17 А), CaF_2—LiF—LaF_5(АНТ—19 А). Флюсы разводят этиловым спиртом до концентрации жидкой пасты и наносят на кромки свариваемых деталей.

Для аустенитной стали применяют флюсы системы CaF_2—LiF, а также TiO_2—MgO—LiF. Для стали перлитного класса применяют флюсы системы TiO_2—MgF_2. При сварке листового титана толщиной до 5 мм коэффициент формы шва может быть доведен до единицы, при этом погонная энергия, необходимая для проплавления металла, может быть уменьшена в 2 раза. На рис. 71 показана зависимость ширины шва и обратного валика от силы сварочного тока при однопроходной сварке сплава ОТ4 $\delta = 5$ мм. С повышением силы тока ширина обратного валика при наличии флюса увеличивается быстрее, чем ширина лицевого валика.

При такой проплавляющей способности дуги имеется возможность получения сварных тавров с толщиной элемента 1—12 мм при различных сочетаниях толщины полки и стенки.

С применением флюсов можно приваривать электрозаклепками листы титановых сплавов толщиной до 12 мм без рассверливания и выполнения углублений в верхнем листе. Форма проплавления при этом близка к цилиндрической. Диаметры цилиндра при оптимальных режимах не превышают толщины привариваемого листа. Возможна также сварка многослойных конструкций.

Высокая проплавляющая способность дуги при наличии флюса связана с повышенной сосредоточенностью теплового потока в пятне нагрева. Флюс на поверхности металла увеличивает напряжение на дуге на 1—4,7 В в зависимости от состава флюса.

Проплавление при сварке по флюсу-галогену возрастает с увеличением потенциала ионизации металла, входящего в галогенид, и с увеличением относительной весовой доли галогена в соединении. В порядке увеличения эффекта проплавления галогены располагаются в следующей последовательности: фтор, бром, хлор.

Применение газообразных и жидких галогенидов. Эффект повышения проплавляющей способности можно получить, если к защитному инертному газу добавить газообразные фториды BF_3, WF_6, SF_6 и жидкие хлориды $SiCl_4$, CCl_4 в парообразном виде и др. Концентрация этих компонентов в защитном газе небольшая и измеряется десятыми долями процента. Парообразную фазу получают продувкой части аргона через жидкий хлорид с последующей подачей в смеситель.

Сварка погруженной дугой. Увеличение проплавляющей способности достигается одновременным повышением интенсивности теплового и силового воздействия дуги.

С увеличением силы тока под давлением дуги происходит оттеснение под электродом жидкого металла. Дуга при этом погружается в сварочную ванну (рис. 72), а поддержание заданного напряжения (длины) дуги осуществляется опусканием электрода (рис. 73) ниже поверхности свариваемого металла. Глубина погружения электрода зависит от напряжения (длины) дуги (рис. 74).

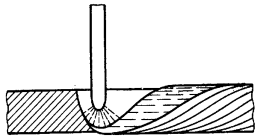


Рис. 72. Схема сварки погруженной дугой

Давление дуги уравновешивается металлостатическим давлением жидкого металла. Поэтому эффект погружения дуги тем больше, чем меньше плотность свариваемого металла. В соответствии с этим металлы большей плотности сваривают на большем токе и пониженной скорости (табл. 29).

Расход аргона в сопло горелки составляет 15—20 л/мин, в приставку для защиты остывающего шва 15—30 л/мин и на обратную сторону шва 6—10 л/мин. В ряде случаев для повышения проплавляющей способности дуги в сопло горелки подают гелий.

В качестве электродов применяют стержни диаметром 10 мм из лантанированного (ВЛ) или иттрированного (ВИ) вольфрама. Угол заточки вольфрамового электрода 15°, притупление 0,2—1,5 мм. Возможны другие формы электрода.

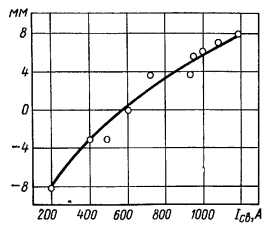


Рис. 73. Зависимость погружения электрода (мм) в основной металл (сплав титана) от сварочного тока при $U_д = 15$ В, $v_{св} = 20$ м/ч

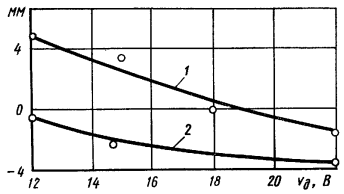


Рис. 74. Зависимость погружения электрода (мм) в основной металл (сплав титана) от напряжения на дуге при $v_{св} = 20$ м/ч:

1) $I_{св} = 700$ А; *2)* $I_{св} = 400$ А

Для устранения подрезов, особенно при односторонней сварке, осуществляют второй проход поверхностной дугой при уменьшенном токе и увеличенном напряжении на дуге.

В некоторых случаях для титановых сплавов можно применять сварку погруженной дугой с принудительным формированием шва водоохлаждаемым роликом. При этом устраняются подрезы, увеличивается скорость охлаждения жидкого металла, улучшается структура металла шва.

При сварке погруженной дугой обеспечивается высокое качество металла шва, расширяются пределы толщин материалов, свариваемых без разделки кромок, повышается производительность сварочных работ, сокращается расход присадочной проволоки.

29. Режимы сварки погруженной дугой

Материал			Режим			
Марка	Толщина, мм	Плотность, г/см³	I, А	U, В	v, м/ч	Вид шва
ОТ4	4 5 10	4,5	350 440 550	10 10,5	36 18	Односторонний
11Х11Н2В2МФ 12Х18Н10Т ХН56ВМТЮ	4 8 5 10	7,8 7,9 8,64	440 600 480 440	11	36 20 36 8	
Х15Н5Д2Т	22	—	900	12—14	22—25	Двусторонний
30ХГСА	10		520—620 440—480	9	9—11 10—12	Односторонний Двусторонний

Сварка при повышенном давлении защитной атмосферы (рис. 75).

В камере, наполненной инертным газом, с повышением давления газа p дуга «отшнуровывается», размеры анодного и катодного пятна сокращаются, увеличивается градиент потенциала столба. При неизменном токе и длине дугового промежутка мощность дуги W растет с увеличением давления защитной атмосферы. Благодаря этому увеличивается глубина проплавления, коэффициент формы шва уменьшается. Например, при наплавке на сталь 12Х18Н9Т ($I = 200$ А; $v_{св} = 15$ м/ч; $l_д = 4$ мм) с повышением давления от 1 до 11 ат глубина проплавления и площадь сечения шва увеличились соответственно на 50 и 25%, а ширина шва уменьшилась на 14%.

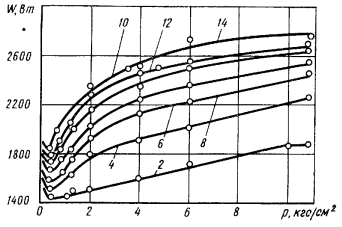


Рис. 75. Зависимость мощности дуги от давления p аргона (цифрами указана длина дуги, мм)

Сварка сжатой дугой. Большие технологические возможности заключены в процессе сварки дугой, сжатой каналом сопла и потоком плазмообразующего газа (плазменно-дуговая сварка). Описание способа сварки сжатой дугой см. на стр. 447.

Техника сварки. *Выбор рода тока.* Сплавы на основе Al, Mg, Be и других металлов, склонных к образованию тугоплавких нерастворимых окислов, сваривают дугой переменного тока, при которой в полупериоды обратной полярности происходит очищение сварочной ванны за счет катодного распыления.

При механизированном процессе для алюминиевых сплавов можно применять постоянный ток прямой полярности, если при этом поддерживать очень короткую дугу. При этом целесообразно использовать в качестве защитной среды гелий, обеспечивающий более глубокое проплавление основного металла по сравнению со сваркой в среде аргона. Оценка свариваемости металла в зависимости от рода тока дана в табл. 30.

30. Выбор рода тока для дуговой сварки вольфрамовым электродом

Материал	Способ сварки *1	Род тока		
		Переменный	Постоянный	
			прямой полярности	обратной полярности
Низкоуглеродистая сталь Низко- и среднелегированная сталь Коррозионно-стойкая и хромоникелевая сталь Жаропрочные хромоникелевые сплавы	Р, М	У	Х	Н
Алюминиевые и магниевые сплавы	Р М	Х Х	Н Х	У У
Медь и сплавы на ее основе Серебро	Р, М	Н	Х	Н
Титан и сплавы на его основе, цирконий, молибден, тантал и другие активные металлы	Р, М	У	Х	Н

*1 Р — ручная; М — механизированная; Х — хорошая свариваемость; У — удовлетворительная; Н — не рекомендуется.

Типы соединений и подготовка их под сварку (табл. 31). Сварку можно выполнять как с присадкой, так и без присадки. При сварке без присадки шов образуется за счет расплавления кромок свариваемого металла. Сварку можно выполнять вручную, а также с помощью автоматов и полуавтоматов.

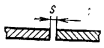
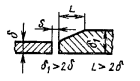
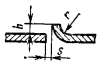
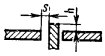
Для качественной автоматической и полуавтоматической сварки металлов, особенно тонколистовых, необходимо обеспечить точную сборку и подгонку свариваемых кромок. Допускаемые зазоры при автоматической сварке приведены в табл. 31. При сборке и сварке следует избегать смещения свариваемых кромок относительно друг друга.

Толщина свариваемого материала, мм	Допускаемое смещение кромок, мм
0,4—0,5	0,15
0,8—1,0	0,15
1,2—1,5	0,30
1,5—2,0	0,35
2,0—3,0	0,40

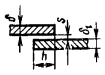
Для этого сварку необходимо производить в приспособлениях, обеспечивающих прижим свариваемых кромок к подкладке, как можно ближе к стыку. Для материала толщиной 1—6 мм усилие прижима должно составлять 20—30 кгс/см. В случае невозможности осуществления прижима вблизи от свариваемых кромок применяют сварочные головки с прижимным роликом или ползунком, перемещающимся вместе с горелкой по свариваемому стыку. При сварке кольцевых швов применяют разжимные кольца или наружные стяжные хомуты.

Подкладки для защиты обратной стороны шва имеют продольные канавки вдоль свариваемого стыка глубиной 0,3—2,0 мм и шириной, равной 5—10-кратной толщине свариваемого металла. Для сварки стали и жаропрочных сплавов подкладки изготовляют из меди, для сварки титана и легких сплавов — из нержавеющей стали.

31. Основные типы соединений и подготовка кромок при автоматической аргоно-дуговой сварке вольфрамовым электродом

Форма разделки кромок под сварку	Толщина материала δ, мм	Величина зазора S, мм, при сварке: без присадки	Величина зазора S, мм, при сварке: с присадкой	h, мм	r, мм
Соединение стыковое					
	0,4—0,6	0—0,10	0—0,15	—	—
	0,6—0,8	0—0,15	0—0,20	—	—
	1,0—2,0	0—0,25	0—0,30	—	—
	2,0—3,0	0—0,30	0—0,40	—	—
	3,0—4,0	—	0—0,50	—	—
	0,8—2,0	0—0,3	0—0,4	—	—
	0,6—1,0	0—0,2	0—0,20	—	—
	1,0—2,0	0—0,3	0—0,30	—	—
	2,0—3,0	0—0,3	0—0,40	—	—
	3,0—4,0	—	0—0,50	—	—
	3,0—4,0	—	—	—	—
Соединение стыковое с отбортовкой					
	0,5—1,0	0—0,5	0—0,5	2	1
	1,0—2,0	0—0,8	0—0,8	3	1,5
	2,0—2,5	0—1,0	0—1,0	4	2,5
	0,5—1,0	—	0—0,2	2	1
	1,0—2,0	0—0,5	0—0,5	3	1,5
	2,0—2,5	—	—	4	2,5
Т-образное соединение					
	0,8—1,0	0—0,2	0—0,2	2	—
	1,0—2,0	0—0,3	0—0,3	3	—
	0,8—1,0	—	—	2	1
	1,0—1,5	0—0,5	0—0,5	3	1,5

Продолжение табл. 31

Форма разделки кромок под сварку	Толщина материала δ, мм	Величина зазора S, мм, при сварке: без присадки	Величина зазора S, мм, при сварке: с присадкой	h, мм	r, мм
Соединение стыковое					
	3—12	—	0,5—1	1,5—2	—
Соединение нахлесточное					
	0,8—2,0	0—0,5	—	—	—
	2,0—10	—	0—0,8	2 (δ + δ1)	—
Соединение угловое					
	0,8—1,5	—	0—0,5	—	—
	1,5—3,0	—	0—0,8	—	—
	3—12	—	0—0,8	—	—

В тех случаях, когда применение подкладок или поддува аргона невозможно, защиту обратной стороны осуществляют с помощью флюса, наносимого тонким слоем на свариваемые кромки заготовок.

Мероприятия по улучшению формирования шва при сварке тонколистовых материалов. Одной из причин нарушения формирования швов являются деформации кромок во время сварки (временные деформации), приводящие к раскрытию стыка. Особенно велики временные деформации кромок, связанные с местной потерей устойчивости, при сварке металлов толщиной < 1 мм.

Прижатие свариваемых кромок. Для устранения волнистости листов в зоне сварки и уменьшения коробления их при местном нагреве применяют прижимное приспособление (рис. 76), состоящее из отдельных клавиш. Клавиши следует изготовлять из немагнитного материала. Расстояние между прижимами должно быть минимальным:

Толщина свариваемого материала, мм	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0	3,0 и более
Расстояние прижима от стыка, мм	3	3	4	5	6	6—8	8—10	10—12	15—30

Влияние временных деформаций листов на формирование шва уменьшается при сварке с направленным прогибом, который осуществляется прокаткой кромок (рис. 77, *а*, *б*) или сборкой соединения под углом 7—10° (рис. 77, *в*). Этот

прием особенно эффективен при сварке металлов с низким модулем упругости, например при сварке алюминия.

Сварка с фиксацией отбортованных кромок. Материалы толщиной 0,2 мм и менее сваривают с отбортовкой кромок. Однако формирование шва в таком соединении нарушается из-за неплотной стыковки и потери устойчивости отбортованных кромок при сварке, шов не имеет плавного перехода к основному металлу (рис. 78, *е*). Высокая стабильность формирования шва может быть обеспечена фиксацией отбортованных кромок. В целях устранения зазоров (рис. 78, *а*, *б*),

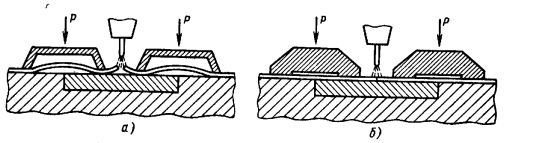


Рис 76. Схемы прижатия свариваемых кромок:
а — линейного; *б* — плоского

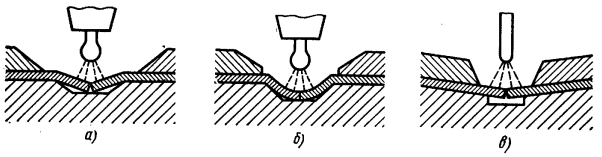


Рис. 77. Схемы сборки соединений для направленной деформации кромок:
а — изгиб кромок под углом; *б* — изгиб кромок по радиусу; *в* — стыковка пластин под углом

приводящих к прожогам при сварке, производят выпрямление кромок и уплотнение соединения двойным перегибом (рис. 78, *в*), затем уплотненное соединение фиксируют путем оплавления вершин отбортованных кромок маломощным источником тепла (рис. 78, *г*). При наплавке этого валика происходит минимальный разогрев кромок, при котором практически не наблюдается коробление. Зафик-

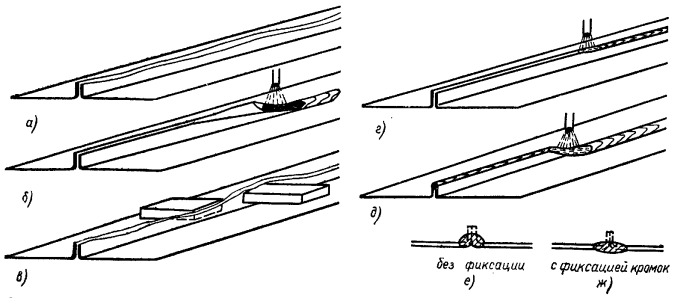


Рис. 78. Схемы сварки с фиксацией отбортованного соединения

сированное таким образом соединение сваривают вторым проходом на рабочем режиме (рис. 78, *д*) при хорошем стабильном формировании шва (рис. 78, *ж*).

Сварка с непрерывным деформированием. Листам, собранным встык или внахлестку, сообщается местный прогиб в плоскости шва в сторону, противоположную сварочной дуге (рис. 79). Прогиб листов значительно увеличивает жесткость свариваемых кромок. Потеря устойчивости при этом имеет направленный характер, и дополнительный прогиб кромок в зоне сварки происходит в сторону, противоположную дуге.

Сварка с непрерывным деформированием может быть применена для получения крупногабаритных заготовок из тонких лент. Сварку лент производят при непрерывном деформировании их. Горелку укрепляют неподвижно, а ленты проталкивают или протягивают вокруг цилиндрической поверхности направляющей

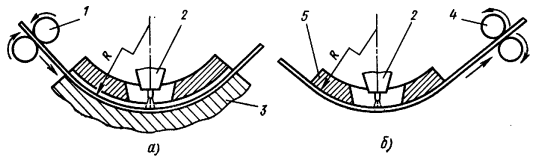


Рис. 79. Схемы сварки с непрерывным деформированием:
а — с проталкиванием свариваемых лент; *б* — с протягиванием свариваемых лент; *1* и *4* — толкающие и тянущие валки; *2* — горелки; *3* — щелевые направляющие; *5* — оправка

станины. Схема с тянущими валиками лучше, так как возникающие при этом растягивающие напряжения в листе способствуют уменьшению остаточных деформаций.

Сварка листовых материалов большой толщины. Применяют разделку кромок. Без разделки сваривают погруженной дугой, а также дугой, расположенной в зазоре между торцами свариваемых деталей (узкощелевое соединение). Многослойная сварка «в щель» неплавящимся электродом позволяет соединять детали толщиной > 60 мм (табл. 32). Первый слой выполняют в узкощелевую разделку, а также на медной подкладке или на остающейся подкладке из металла по составу, близкому к свариваемому. В качестве электрода применяют стержни вольфрама (активированного) диаметром 2,5—4 мм. Оптимальная ширина щели 6—8 мм. Такой зазор между деталями позволяет сваривать их без опасности замыкания вольфрамового электрода на кромки деталей. При этом обеспечивается одновременное и равномерное оплавление обоих торцов деталей, осуществляется эффективная газовая защита.

32. Режимы сварки «в щель» неплавящимся электродом *1 деталей из стали Хf5Н5Д2Т толщиной 10—50 мм

Номер слоя	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Расход смеси Ar — He, л/мин	
				Аргон	Гелий
1	250—300	15—18	14—18	5—7	5—7
2 — (*n* — 1)	350—400	14—18	12—18		
n	250—320	12—16	12—18		

*1 *n* — число слоев; $v_{пров} = 50 \div 65$ м/ч; $d_{пров} = 2$ мм.

Стабильность процесса сварки «в щель» можно существенно повысить, если осуществлять поперечные колебания дуги за счет вращательных колебаний электрода с изогнутым рабочим участком. Амплитуда колебаний электрода в этом случае автоматически или вручную устанавливается по напряжению на дуге в крайних положениях (в «мертвых» точках колебательного цикла).

Дуга в щели горит устойчиво. При одинаковом вылете стойкость вольфрамового электрода в щели выше, чем на поверхности. При горении дуги в щели сокращаются потери энергии в окружающую среду и, таким образом, повышается эффективный КПД нагрева изделия. Для обеспечения надежного межслойного сплавления рекомендуется присадочную проволоку подавать за дугой в сварочную ванну. В качестве защитной среды применяют аргон или смесь аргона с гелием (50%).

Автоматическая дуговая сварка без разделки кромок в узкую щель обеспечивает высокие стабильные механические свойства соединений при относительно небольшой трудоемкости процесса.

Сварка плавящимся электродом. При сварке дуга горит между концом непрерывно расплавляемой проволоки и изделием. Проволока подается в зону дуги с помощью механизма со скоростью, равной средней скорости ее плавления. Это обусловливает постоянство средней длины дугового промежутка. Расплавленный металл электродной проволоки переходит в сварочную ванну и, таким образом, участвует в формировании шва. В качестве защитной среды применяют как инертные, так и активные газы, а также их смеси.

Преимущества плавящегося электрода при сварке в защитных газах следующие:

высокий удельный тепловой поток, обеспечивающий относительно узкую зону термического влияния;

возможность металлургического воздействия на металл шва за счет регулирования состава проволоки и защитного газа;

широкие возможности механизации и автоматизации процесса сварки;

высокая производительность сварочного процесса.

Перенос металла в дуге. Перенос металла через дуговой промежуток обусловливает технологические характеристики дуги. От характера переноса металла зависят стабильность горения дуги, ее тепловой баланс, металлургические реакции в зоне сварки, размеры проплавления и формирование шва.

Силы, действующие на капли электродного металла. Перенос металла через дуговой промежуток происходит в виде капель и паров. Капли формируются на конце электрода под воздействием силы тяжести, поверхностного натяжения, давления газов, образующихся внутри расплавленного металла, кинетической энергии движущихся газов, электростатических и электродинамических сил, реактивного давления паров металла, а при сварке в среде многоатомных газов под воздействием дополнительного давления в зоне активного пятна, связанного с диссоциацией молекул газа.

Основными силами, обусловливающими формирование капель электродного металла и перенос его через дуговой промежуток, являются аксиальная сила, возникающая в результате пинч-эффекта, и силы поверхностного натяжения. Сила тяжести имеет практическое значение при токе, относительно небольшом для диаметра проволоки. Расплавленный металл на конце электрода под действием поверхностного натяжения собирается в капли. По мере расплавления электрода капля растет до такого объема, когда ее вес становится равным силе поверхностного натяжения, и капля отрывается.

Поверхностное натяжение различных металлов в жидком состоянии различается существенно. Коэффициент σ поверхностного натяжения некоторых металлов следующий:

Металлы	Mg	Zn	Al	Cu	Fe	Ti	Mo	W	Сталь 18-8 с содержанием N_2, %	
									0,02	0,23
σ, Н/м	0,65	0,77	0,90	1,15	1,22	1,51	2,25	2,68	1,10	2,50

При взаимодействии металла с газами поверхностное натяжение изменяется. Азот повышает поверхностное натяжение, а кислород — снижает (рис. 80).

С повышением температуры поверхностное натяжение уменьшается. С увеличением силы тока уменьшается роль силы тяжести в формировании капли и растет сжимающее действие электромагнитных сил, способствующих отделению капли от конца электрода. Благодаря этому по мере увеличения тока уменьшается размер капель электродного металла, изменяется характер переноса металла от крупнокапельного к мелкокапельному, а затем к струйному (рис. 81).

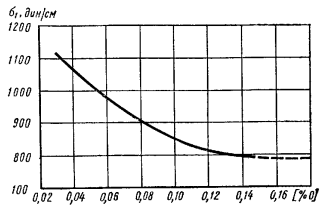


Рис. 80. Влияние кислорода на поверхностное натяжение расплавленного железа

На поверхности капли происходит испарение металла. Реактивное давление паров и выделяющихся газов при определенных условиях может влиять на перенос металла. В среде аргона реактивное давление паров металла незначительно и его можно не принимать во внимание.

При сварке в среде многоатомных газов протекает реакция диссоциации молекул с увеличением объема:

$$2CO_2 \rightarrow 2CO + O_2, \quad N_2 \rightarrow N + N \text{ и др.}$$

Эта реакция эндотермическая, поэтому она протекает в зоне наибольшего выделения энергии, в активных пятнах дуги. Избыточное давление в зоне активного пятна, вызванное диссоциацией газа, воздействует на формирование капель расплавленного металла и является одной из основных причин отклонения капель

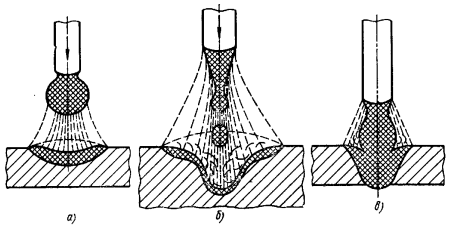


Рис. 81. Разновидности переноса металла в дуге при сварке в среде защитных газов:

а — крупнокапельный; *б* — струйный; *в* — с короткими замыканиями (сварка короткой дугой)

от оси электрода. В некоторых случаях следует учитывать кинетическую энергию плазменного потока. Силу воздействия плазменного потока на каплю можно оценить следующим образом:

$$F_{пл} = m_{пл} v,$$

где $m_{пл}$ — масса потока плазмы, проходящая через заданное сечение в единицу времени; v — скорость потока плазмы.

Судя по тому, что капля в полете через дуговой промежуток не получает существенного ускорения, роль этой силы в переносе металла второстепенна.

Разновидности переноса металла. С увеличением силы тока растет электродинамическая сила, уменьшается размер капель, и при определенном значении тока, называемом *критическим,* капельный перенос металла переходит в струйный. Механизм струйного переноса металла состоит в следующем.

В расплавленном металле на конце электрода благодаря пинч-эффекту создается металлостатическое давление, возрастающее от периферии к оси проводника. При большом токе расплавленный металл «отжимается» в зону дуги, вытягивается и принимает форму конуса (рис. 82). Поперечное сечение столба жидкого металла постепенно уменьшается до некоторого диаметра, при котором давление, создаваемое поверхностным натяжением, становится равным гидростатическому давлению, вызванному пинч-эффектом. При этом диаметре по мере поступления новых порций расплавленного металла происходит формирование капли с последующим ее отделением.

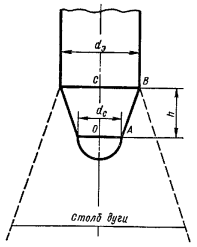


Рис. 82. Схема процесса образования капли на конце электрода при струйном переносе металла

Критическим током $I_{кр}$ принято называть такой, при котором отношение минимального диаметра (радиуса) струи к диаметру (радиусу) электрода равно 0,7. Тогда, основываясь на уравнении баланса давления в точке A, можно определить величину критического тока [31]:

$$I_{кр} = 32{,}7\sqrt{\sigma d_э},$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения металла электрода, дин/см; $d_э$ — диаметр электрода, см.

По известной величине критического тока, установленной опытным путем для данного диаметра проволоки, можно определить критический ток проволоки любого диаметра, используя следующее равенство:

$$\frac{I_{кр1}}{I_{кр2}} = \sqrt{\frac{d_{э1}}{d_{э2}}}.$$

Критический ток определяют экспериментально с помощью киносъемки, менее точно — визуальным наблюдением, путем проектирования на экран в специальной камере.

Критический ток для проволоки марки 12Х18Н9Т разных диаметров при горении дуги в среде аргона имеет следующие значения:

Диаметр электрода, мм	1,0	1,6	2,0	2,5	3,0
Критический ток, А	190	240	280	320	350

Нагрев проволоки на вылет джоулевым теплом изменяет градиент температуры в зоне плавления электрода. Поэтому с изменением вылета электрода несколько изменяется величина критического тока (рис. 83). Перенос металла в дуге зависит от состава защитного газа (табл. 33).

Кислород уменьшает поверхностное натяжение металла, и поэтому с увеличением его содержания в аргоне критический ток уменьшается (рис. 84). Высокие технологические свойства дуги при сварке стали обеспечиваются при добавке к аргону до 4—5% O_2. В такой среде дуга горит стабильно при относительно небольшом токе, что облегчает сварку металлов небольшой толщины. Дуга со струйным переносом металла дает меньшее разбрызгивание металла и обеспечивает лучшее формирование шва.

Азот повышает поверхностное натяжение металла, поэтому с увеличением содержания азота в аргоне при одном и том же токе размер капель увеличивается. При сварке в среде азота происходит крупнокапельный перенос металла с интенсивным разбрызгиванием. Отрыву капли предшествует интенсивное отдувание

33. Влияние условий сварки на перенос металла в дуге.

Состав защитного газа	Полярность	I, А	Схема переноса металла	Состав защитного газа	Полярность	I, А	Схема переноса металла
Ar	О	240		Ar+20% CO_2	О	300	
		300		CO_2			
	П			20% N_2			
Ar+1% O_2	О			N_2			
Ar+20% O_2				10% H_2			
Ar+5% CO_2				20% H_2			
				Ar+10% CO_2		240	

Примечание: О — обратная, П — прямая

ее вверх под влиянием давления в зоне активного пятна в результате диссоциации N_2.

Водород способствует увеличению критического тока. При небольших добавках H_2 (5—10%) капли вырастают до больших размеров, сохраняя сферическую форму. При сварке в аргоне, содержащем > 20% H_2, перенос металла сопровождается взрывами капель и интенсивным разбрызгиванием.

Углекислый газ способствует увеличению поверхностного натяжения. При добавлении к аргону углекислого газа $I_{кр}$ возрастает, размер капель увеличивается. При содержании в аргоне 5% CO_2 струйный перенос металла начинается при силе тока на 10—15 А больше, чем в аргоне. Добавление к аргону 20% CO_2 приводит к значительному увеличению размера капель. При сварке в CO_2, как и в N_2, наблюдается интенсивное отталкивание капель вверх.

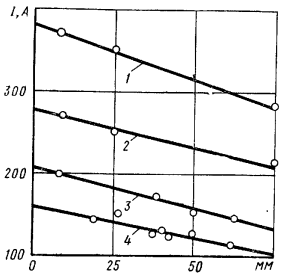


Рис. 83. Зависимость критического тока от вылета электрода. Диаметры электродов, мм:

1 — 2,4; *2* — 1,6; *3* — 1,1; *4* — 0,7

Критический ток в среде аргона можно существенно уменьшить (рис. 85), особенно при прямой полярности, если электродную проволоку активировать щелочными и щелочноземельными элементами путем введения их в состав проволоки или нанесения на ее поверхность. Применение активаторов при сварке в углекислом газе позволяет перевести крупнокапельный перенос металла в мелкокапельный (рис. 86).

Особенности сварки короткой дугой. Тонколистовые материалы следует сваривать короткой дугой, при которой капли, образующиеся на конце электрода, периодически замыкают дуговой промежуток. При таком переносе металла имеет место концентрированный разогрев основного металла, поверхность расплавленного металла относительно невелика, металл сварочной ванны благодаря поверхностному натяжению хорошо сопротивляется механическим импульсам дуги.

Перенос металла при короткой дуге происходит следующим образом (рис. 87). На конце электрода развивается капля в результате теплового воздействия активного пятна. При относительно небольшом токе и малом зазоре между электродом и изделием капля не успевает развиться до полного размера, происходит

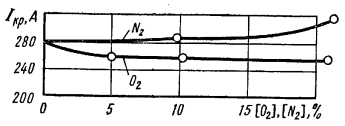


Рис. 84. Влияние O_2 и N_2 в аргоне на $I_{кр}$. Обратная полярность, проволока Св-12Х18Н9Т ⌀ 2 мм

замыкание ее на сварочную ванну. Полное отделение капли от электрода происходит в результате электродинамической силы, возникающей при изменении сечения электрода на границе твердого и жидкого металла. Под действием пинч-эффекта происходит образование шейки, которая разрывается со взрывом. При взрыве шейки сварочная ванна получает тепловой и механический импульсы.

Стабильность формирования шва зависит в значительной мере от частоты и мощности тепловых импульсов. При прочих равных условиях мощность импульсов зависит от диаметра проволоки и от статических и динамических свойств источников питания. С увеличением диаметра электрода повышается «жесткость» дуги, т. е. перенос металла сопровождается более мощным тепловым и механическими импульсами со значительным разбрызгиванием. В связи с этим при сварке тонких металлов короткой дугой обычно применяют проволоку диаметром 0,5—1,2 мм.

Разбрызгивание металла. Перенос электродного металла в дуге сопровождается выбросом металла за пределы сварочной ванны — разбрызгиванием. Это явление зависит от параметров режима сварки, от состава защитной среды, а также от состава электродного и основного металлов.

При сварке в среде аргона разбрызгивание металла составляет 2—3%. При добавлении к аргону многоатомных газов разбрызгивание значительно увеличивается (рис. 88), и в случае применения в качестве защитных газов чистых многоатомных газов, например CO_2, предотвращение или уменьшение разбрызгивания представляет важную технологическую проблему.

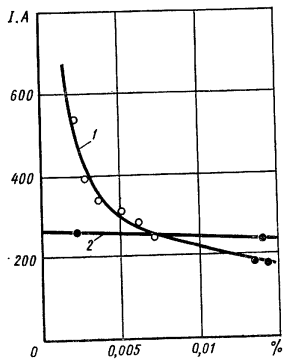


Рис. 85. Зависимость критического тока от степени активации электрода цезием (Cs):

1 — постоянный ток прямой полярности; *2* — постоянный ток обратной полярности

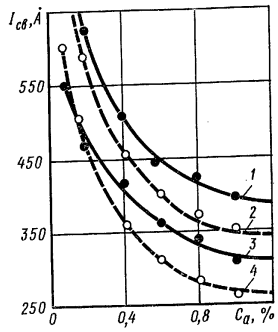


Рис. 86. Зависимость критического тока от концентрации активатора (C_a) бихромата калия:

——— — обратная полярность; — — — — — прямая полярность; *1*, *2* — вылет электрода 20 мм; *3*, *4* — вылет электрода 60 мм

При сварке в CO_2 разбрызгивание металла происходит в результате выброса мелких брызг при взрыве перемычки между электродом и каплей, отделения остатка жидкого металла от электрода, расплескивания ванны, выброса крупных капель при сильном взрыве перемычки, выброса мелких капель металла из ванны, взрыва крупных капель на электроде и выброса разогретой и оплавленной части электрода (при возбуждении дуги). Во время сварки длинной дугой разбрызгиванию способствуют металлургические реакции в жидком металле, сопровождаемые выделением газов, а также реактивные силы испарения металла и диссоциации газа, выталкивающие капли за пределы сварочной ванны.

Основной причиной разбрызгивания металла при сварке с короткими замыканиями является электрический взрыв перемычки между электродом и ванной. С повышением напряжения на дуге разбрызгивание увеличивается, особенно в диапазоне средних токов. Зависимость разбрызгивания от силы тока показана на рис. 89. Основные меры по уменьшению разбрызгивания сводятся к следующему:

применению источников питания с определенными динамическими свойствами, обеспечивающими оптимальные скорости нарастания тока короткого замыкания; выполнению сварки с оптимальной скоростью; поддержанию постоянства длины дуги за счет стабилизации напряжения источника питания, скорости подачи проволоки и вылета электрода; очистке проволоки от ржавчины, прокаливанию ее при температуре 200—250° С в течение 2 ч.

Уменьшение разбрызгивания можно обеспечить при принудительном управлении переносом электродного металла импульсами сварочного тока.

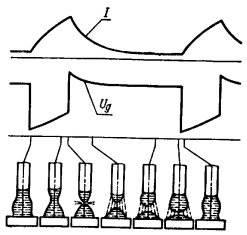


Рис. 87. Типичный перенос металла в дуге и соответствующие изменения тока I и напряжения на дуге $U_д$ при сварке короткой дугой

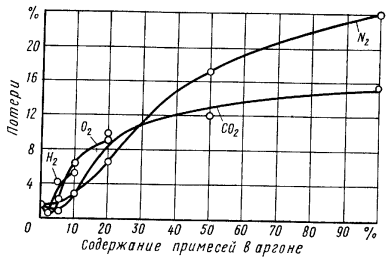


Рис. 88. Влияние состава защитного газа на разбрызгивание металла: примеси H_2, O_2; N_2 и CO_2

Повышение стабильности дуги и сокращение потерь металла на разбрызгивание при сварке в CO_2 обеспечивается за счет применения активированных проволок.

При разбрызгивании металла происходит засорение сопла горелки с нарушением защитных свойств струи, а также прилипание капель к поверхности свариваемого изделия.

Для уменьшения прилипания брызг к соплу, последнее необходимо интенсивно охлаждать. Детали и приспособления защищают специальными смазками.

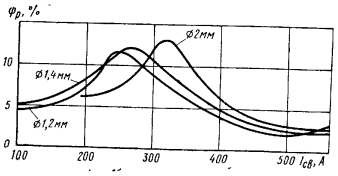


Рис. 89. Зависимость потерь на разбрызгивание от силы тока при обратной полярности в среде CO_2. Проволока Св-08Г2С

Удовлетворительную защиту обеспечивают смазки, состоящие из обезжиренного циркона, поливинилбутираля и растворителя, а также из алюминиевой пудры, замешенной на растворе жидкого стекла. Хорошие защитные свойства имеет покрытие из кремнеорганической жидкости ГКЖ-94. Жидкость наносят на поверхность деталей, а также мундштуков-сопл горелок тонким слоем кистью или смоченной в жидкости ветошью. Кремнеорганическое покрытие сохраняет защитные свойства при наплавке шести слоев металла и более.

Силовое воздействие дуги. В несимметричных сварочных дугах имеет место стационарный осевой поток плазмы, паров и газа от

электрода к свариваемому изделию. В дугах большой мощности интенсивность осевого потока такова, что он воздействует на перенос металла, а также на состояние сварочной ванны.

Осевой поток обусловлен электромагнитными силами. Давление потока на сварочную ванну пропорционально квадрату тока:

$$p_д = k_д I^2,$$

где $k_д$ — по табл. 34.

Чем больше масса газов и частиц металла, вовлекаемых в поток при прочих равных условиях, тем больше живая сила потока, воспринимаемая сварочной ванной. Поэтому дуга с плавящимся электродом оказывает большее силовое воздействие на сварочную ванну, чем дуга с вольфрамовым электродом.

Силовое воздействие дуги зависит от диаметра электрода и полярности. При оценке интенсивности силового воздействия дуги необходимо учитывать площадь, на которую распределяется давление потока газов и металла в дуге. В связи с этим удельное силовое воздействие дуги уменьшается с ее удлинением. При определенных условиях (короткая дуга, большой ток) дуга вытесняет жидкий металл и погружается в сварочную ванну, способствуя глубокому проплавлению.

34. Зависимость коэффициента $k_д$ от условий сварки

Электрод		Полярность	$k_д \cdot 10^6$, тс/А²
Металл	Диаметр, мм		
Вольфрам	2—5	Прямая	2,3
	1,5		3,6—6,3
Сталь	1,6		3,7
	2,0		3,1
	0,5	Обратная	8,0
	1,0		6,1
	1,6		3,8
	2,0		3,6
	3,0		3,3
	4,0		2,8
	5,0		1,8

Тепловые характеристики дуги. *Эффективная мощность дуги* зависит от характера переноса металла в дуге, длины дуги и расположения дуги относительно сварочной ванны. Так, например при сварке в аргоне электродом из стали 12Х18Н9Т диаметром 2,0 мм при силе тока 200—250 А, когда имеет место крупнокапельный перенос металла, эффективный КПД $\eta_и = 0{,}70 \div 0{,}75$; при увеличении силы тока до 350—370 А, когда происходит струйный перенос металла и дуга погружается в основной металл, $\eta_и$ увеличивается до 0,8. Однако дальнейшее увеличение силы тока мало сказывается на повышении $\eta_и$.

При удлинении дуги с 5—6 до 11—12 мм при силе тока 350 А $\eta_и$ уменьшается с 0,8 до 0,7. С уменьшением диаметра проволоки с 2 до 1,6 мм при силе тока 320 А $\eta_и$ повышается с 0,78 до 0,82, что объясняется большей сосредоточенностью теплового потока и углублением дуги в свариваемый металл.

При замене защитной атмосферы аргона на аргоно-кислородную смесь или углекислый газ $\eta_и$ увеличивается с 0,77 до 0,80 при прочих равных условиях (проволока Св-20ХМА ⌀ 2 мм; $I = 320 \div 350$ А).

Баланс тепла, воспринимаемого основным металлом. Значительная часть тепловой энергии переносится в свариваемый металл электродным металлом (рис. 90), так как металл в жидком и парообразном состоянии имеет значительное теплосодержание (например, теплосодержание жидкого железа в точке кипения равно 500 кал/г, удельная теплота испарения железа равна 1595 кал/г). В связи с этим наибольший удельный тепловой поток увеличивается с уменьшением размера капель, при переходе к струйному переносу металла, а также при увеличении доли паровой фазы.

Проплавление и формирование шва. В зависимости от характера переноса металла интенсивность теплового и механического воздействия дуги на сварочную ванну изменяется в широких пределах. При сварке в среде инертных газов на токе больше критического перенос металла осущест-

вляется во внутренней зоне дуги, имеющей форму конуса. Площадь основания конуса внутренней зоны дуги, через который направлен в сварочную ванну основной поток тепла с каплями и парами металла, зависит от величины сварочного тока, диаметра электродной проволоки, длины дуги, физических свойств электродного металла и среды, в которой горит дуга. При сварке дугой с крупнока-

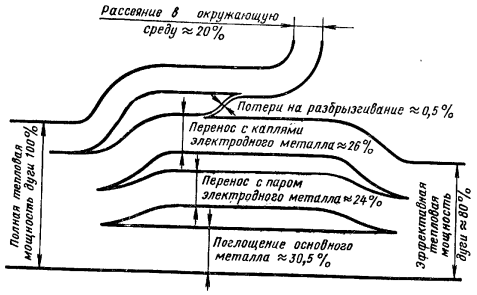
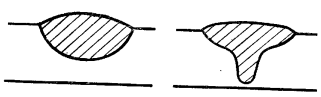


Рис. 90. Баланс тепла, сообщаемого основному металлу при сварке плавящимся электродом в среде аргона. Обратная полярность; проволока Св-12Х18Н9Т ⌀ 2 мм; $I_д = 350$ А; $U_д = 25$ В; $v_{св} = 32$ м/ч

пельным переносом металла тепловое и силовое воздействие распространяется на большей площади.

Зависимость геометрических параметров шва от условий и режима сварки обусловливается изменением интенсивности теплового и силового воздействия дуги на свариваемый металл.

Сварочный ток. При малых токах, когда происходит крупнокапельный перенос металла, проплавление имеет форму кругового сегмента (рис. 91). При токе больше критического, при струйном переносе металла, проплавление имеет местное углубление, получившееся в результате сосредоточенного потока электродного металла.



а *б*

Рис. 91. Форма проплавления в зависимости от силы тока:
а — при $I < I_{кр}$; *б* — при $I > I_{кр}$

Длина дуги. С удлинением дуги уменьшается ее силовое воздействие, а также интенсивность теплового потока. Это приводит к уменьшению глубины и площади проплавления, а также к уменьшению местного углубления при струйном переносе металла.

Диаметр электродной проволоки. С увеличением диаметра проволоки увеличивается размер капель, уменьшается концентрация потока газов и паров металла. Следствием этого является уменьшение удельного силового воздействия дуги и интенсивности теплового потока и соответственно уменьшение глубины и площади проплавления.

Полярность. При прямой полярности площадь и глубина проплавления меньше, чем при обратной. Например, при наплавке в аргоне на пластины из коррозионно-стойкой хромоникелевой стали дугой прямой полярности при силе

тока 360 А и диаметре проволоки 2,0 мм площадь проплавления на 28% и глубина проплавления на 36% меньше, чем при обратной полярности.

Состав защитного газа. С изменением состава защитного газа изменяется перенос металла и мощность дуги. Это обусловливает форму и размеры проплавления. Например, при добавлении к аргону CO_2 повышается напряжение на дуге (см. рис. 46), растет эффективная мощность дуги, увеличивается площадь проплавления (рис. 92). Глубина проплавления увеличивается незначительно, так как с переходом от струйного переноса металла в аргоне к крупнокапельному в CO_2 уменьшается сосредоточенность теплового и газового потока. Форма проплавления с местным углублением в среде Ar переходит к сегментовидной в среде CO_2. Аналогичным образом влияют на проплавление водород и азот.

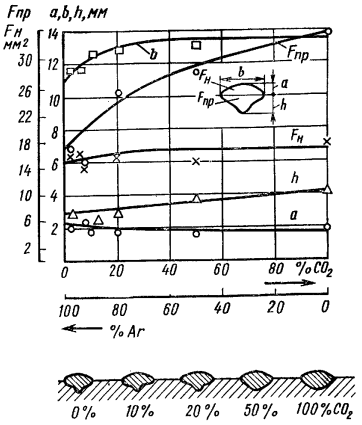


Рис. 92. Влияние состава защитной смеси Ar — CO_2 на форму и размеры проплавления. Основной металл — сталь 30ХГСА; проволока Св-20ХМА ⌀ 2 мм; сила тока 300 А

Плавление электродной проволоки. Часть мощности q дуги расходуется на нагрев и плавление электродной проволоки:

$$q_э = \eta_э q = \eta_э UI.$$

Коэффициент $\eta_э$, называемый эффективным КПД нагрева электрода, характеризует долю мощности дуги, расходуемой на плавление электрода, и зависит от условий передачи энергии электроду. Нагрев и плавление электрода обусловливаются тепловыми процессами в приэлектродных областях. Энергия, выделяемая в столбе дуги, играет второстепенную роль в плавлении электрода и ею практически можно пренебречь.

Состояние катода, в отличие от анода, в значительной степени влияет на выделение энергии в приэлектродной области, что обусловливает существенную зависимость коэффициента расплавления электрода $\alpha_р$ при прямой полярности от состава и подготовки электродной проволоки (табл. 35). Состав защитного газа практически не влияет на коэффициент плавления электрода (табл. 36).

35. Зависимость $\alpha_р$ от состояния поверхности электрода

Полярность	$\alpha_р$, г/А · ч, при проволоке					
	зачищенной			покрытой окалиной		
	Аргон	Воздух	Углекислый газ	Аргон	Воздух	Углекислый газ
Прямая	14,4	15,3	17,3	6,3	7,2	9,4
Обратная	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6	12,6

Примечание. Сварка низкоуглеродистой проволокой диаметром 4 мм.

При сварке плавящимся электродом в среде защитных газов при высокой плотности тока плавление электрода обусловливается не только энергией дуги, но и теплом, выделяющимся в вылете электрода при прохождении сварочного тока. Поэтому коэффициент расплавления электродной проволоки

$$\alpha_р = \alpha_р^д + \alpha_р^н,$$

где $\alpha_р^д$ — составляющая, обусловленная энергией, выделяемой в дуге; $\alpha_р^н$ — составляющая, обусловленная нагревом вылета электрода током.

Величину $\alpha_р^д$ можно определить, экстраполируя зависимость $\alpha_р$ от вылета электрода (рис. 93). $\alpha_р^н$ пропорциональна мощности I^2R, выделяемой вылетом электрода. Поэтому способ повышения производительности наплавки иногда называют I^2R-нагревом.

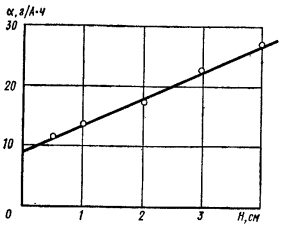


Рис. 93. Зависимость коэффициента расплавления электрода от вылета. Постоянный ток; обратная полярность; проволока Св-12Х18Н9Т ⌀ 1,6 мм; сила тока 345 А

При линейной аппроксимации зависимости электросопротивления проволоки от температуры $\rho_т = \rho_0 (1 + \beta T)$.

36. Коэффициент расплавления $\alpha_р$, г/А · ч

Защитный газ	Полярность	
	прямая	обратная
Аргон	26,8	15,6
Гелий	27,2	15,3
Азот	25,2	15,3
Углекислый газ	25,2	16,0

Примечание. Электрод из низкоуглеродистой проволоки диаметром 1,6 мм; сила тока 350 А; длина вылета 20 мм.

Температуру нагрева электрода можно определить по формуле

$$T = \left(T_0 + \frac{1}{\beta}\right) \exp\left(\frac{0{,}24\beta\rho_0 j^2}{c\gamma v} z\right) - \frac{1}{\beta},$$

где T_0 — начальная температура электрода (температура окружающей среды), °С; ρ — удельное электросопротивление электродной проволоки при 0 °С, Ом·см; β — температурный коэффициент электросопротивления, 1/°С; j — плотность тока, А/см²; $c\gamma$ — удельная объемная теплоемкость, кал/(см³ × × °С); v — скорость подачи проволоки, см/с; z — расстояние данной точки электрода от токоподводящего мундштука, см.

Количество тепла, выделяемого в электроде при заданном режиме сварки, можно определить по формуле [53]

$$q_н = \pi r^2 c\gamma v \left(T_0 + \frac{1}{\beta}\right)\left[\exp\left(\frac{0{,}24\beta\rho_0 j^2 H}{c\gamma v}\right) - 1\right] - 0{,}24\pi r^2 \beta\rho_0 j^2 H T_0,$$

где H — вылет электрода, см; r — радиус электрода, см.

За счет увеличения вылета можно значительно повысить скорость плавления электрода. Например, при силе тока 345 А с увеличением вылета с 5 до 20 мм скорость плавления электродной проволоки Св-12Х18Н9Т ⌀ 1,6 мм увеличивается в 2 раза.

Саморегулирование дуги. Для получения постоянного высокого качества сварных швов необходимым условием является поддержание постоянной длины дуги. Постоянство длины дуги можно обеспечить применением системы автоматического регулирования скорости подачи проволоки в зависимости от напряжения дуги при питании ее от источника с падающей внешней характеристикой. Однако такие системы нашли применение только при сварке проволоками больших диаметров (3—6 мм). Для сварки проволоками малых диаметров рациональнее применять системы, основанные на саморегулировании дуги.

Интенсивность саморегулирования дуги зависит от статических характеристик дуги и источника питания.

Условием статической устойчивости системы источник—дуга является соотношение

$$k_д = \left(\frac{\partial U_д}{\partial I} - \frac{\partial U_и}{\partial I}\right)_{I_р} > 0,$$

где $\frac{\partial U_д}{\partial I}$ и $\frac{\partial U_и}{\partial I}$ представляют собой тангенсы угла наклона вольт-амперной характеристики дуги и источника при рабочем токе $I_р$.

Дуга с плавящимся электродом в среде защитных газов имеет возрастающую вольт-амперную характеристику (рис. 94) и может быть выражена зависимостью $U_д = U_0 + k_д I$.

Значения $k_д = \frac{\partial U_д}{\partial I}$, характеризующего подъем вольт-амперной характеристики, приведены в табл. 37.

37. Коэффициент $k_д$ в зависимости от условий сварки (обратная полярность)

Электродная проволока		Защитный газ	Длина дуги, мм	$k_д$, В/А
Материал	Диаметр, мм			
Коррозионно-стойкая хромоникелевая сталь	1,0	Аргон	3	0,057
	1,6			0,050
	2,0			0,040
	1,0		6	0,059
		Аргон и 5% O_2		0,042
				0,030 *1
	1,6	CO_2	3	0,082
	2,0			0,060
	1,0			0,054
Низкоуглеродистая сталь	0,8			0,071
Алюминий	1,0	Аргон	6	0,073
				0,064
		Гелий		0,100
Алюминиевая бронза	1,6	Аргон		0,025
				0,037

*1 Прямая полярность.

Электрические параметры дуги определяются точкой пересечения статических характеристик дуги и источника. При этом режиме длина дуги автоматически поддерживается постоянной, если скорость плавления электродной проволоки $v_э$ равна скорости ее подачи $v_п$.

На рис. 95 показаны две характеристики дуги длиной l_1 и l_2 и внешние характеристики источника питания (*1, 2, 3, 4*), имеющие различный наклон к оси *I*. При заданном режиме и характеристике *1* источника удлинение дуги с l_1 до l_2

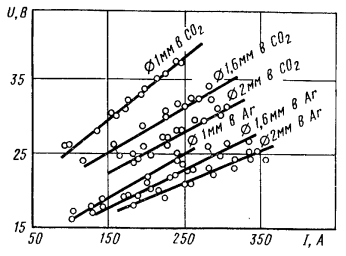


Рис. 94. Вольт-амперные характеристики дуги с электродами из стали 12Х18Н9Т

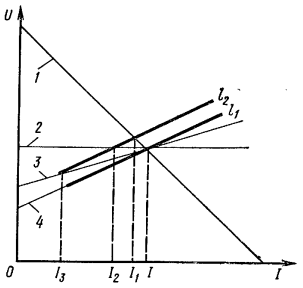


Рис. 95. Вольт-амперные характеристики дуги длиной l_1 и l_2 и источника питания

связано с уменьшением силы тока с I_1 до I_2, при этом скорость плавления электрода уменьшается и дуга восстанавливает свою первоначальную длину.

При уменьшении напряжения холостого хода источника (характеристики *2, 3* и *4* на рис. 95) одному и тому же изменению длины дуги соответствует большее изменение силы тока. Поэтому с уменьшением напряжения холостого хода источника питания интенсивность саморегулирования дуги повышается.

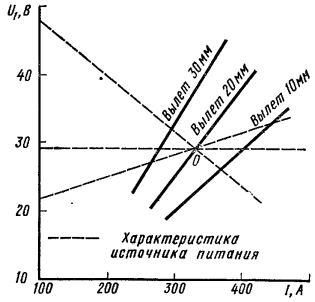


Рис. 96. Вольт-амперные характеристики дуги при постоянной скорости подачи проволоки и разных вылетах электрода

На рис. 96 показаны вольт-амперные характеристики дуги при постоянной скорости подачи проволоки для разных вылетов электрода. На этом же графике нанесены внешние характеристики источника: падающая, жесткая и возрастающая. Из сопоставления характеристик следует, что с увеличением вылета электрода длина дуги при падающей внешней характеристике источника увеличивается, а при возрастающей уменьшается. В наименьшей степени длина дуги изменяется с изменением вылета электрода при жесткой характеристике источника.

На основании сопоставления вольт-амперных характеристик дуги и источника (см. рис. 95 и 96) можно сформулировать требования к источникам питания. При полуавтоматической сварке, когда возможны значительные изменения вылета электрода, следует применять источники питания с жесткой внешней характеристикой; при автоматической сварке, когда вылет электрода изменяется мало, можно применять источники с жесткой и возрастающей характеристиками. При неравномерной подаче проволоки рекомендуется применять источники с возрастающей характеристикой.

Для облегчения возбуждения дуги рекомендуется применять источники, у которых наряду с возрастающими характеристиками в рабочей части при малых нагрузках и холостом ходе повышено напряжение.

При сварке плавящимся электродом короткой дугой, сопровождающейся замыканиями дугового промежутка каплями металла с частотой 20—200 в секунду, стабильность процесса и качество сварки в значительной мере зависят от динамических свойств источников питания и сварочной цепи. Динамические свойства обусловливают время возбуждения и стабильность горения дуги.

За критерий динамических свойств источника принята скорость нарастания силы тока $\frac{\Delta I_{кз}}{\Delta t}$ при коротких замыканиях дугового промежутка. При сварке проволоками диаметром 0,5—1,4 мм с частыми короткими замыканиями рекомендуется $\frac{\Delta I_{кз}}{\Delta t} = 70 \div 200$ кА/с. Для сварки проволокой диаметром $>$ 1,6 мм рекомендуется $\frac{\Delta I_{кз}}{\Delta t} = 10 \div 30$ кА/с.

Техника сварки. К основным параметрам режима сварки плавящимся электродом относятся сила тока, полярность, напряжение дуги, диаметр и скорость подачи электродной проволоки, расход и состав защитного газа, вылет электрода, скорость сварки.

Сварку плавящимся электродом обычно производят на обратной полярности. При прямой полярности скорость расплавления в 1,4—1,6 раза выше, чем при обратной полярности, однако дуга горит менее стабильно с интенсивным разбрызгиванием.

Вылет электрода благодаря высокой плотности тока оказывает существенное влияние на энергетический баланс при сварке и на стабильность процесса. Оптимальные величины вылета стального электрода следующие:

Диаметр электродной проволоки, мм	0,5	0,8	1,0	1,6	2,0	2,5	3,0 и более
Вылет электрода, мм	5—7	6—8	8—11	11—14	14—17	17—20	20—30

Сварочный ток, обусловливающий размеры шва и производительность процесса, зависит от диаметра и состава проволоки и устанавливается в соответствии со скоростью подачи проволоки (рис. 97). Для проволоки различного диаметра рекомендуются определенные пределы сварочного тока, при которых обеспечивается стабильность процесса сварки (рис. 98). Напряжение на дуге устанавливается в зависимости от силы тока (рис. 99) с учетом формирования шва, разбрызгивания металла и производительности процесса. В ряде случаев для повышения производительности применяют форсированные режимы (см. рис. 98 и 99).

Выбор защитного газа осуществляют с учетом состава свариваемого металла, требований к сварным соединениям, их свойствам и внешнему виду, производительности и экономичности процесса.

При применении инертных газов тонколистовые материалы толщиной $<$3—4 мм сваривают короткой дугой с периодическими замыканиями дугового промежутка. Материалы большей толщины сваривают при токе больше критического, при струйном переносе металла. Оптимальная внешняя составляющая длины дуги при этом равна 5—7 мм, что составляет 24—35 В в зависимости от силы тока.

В случаях применения в качестве защитной среды углекислого газа сварку ведут в основном с короткими замыканиями дугового промежутка, реже с крупнокапельным переносом металла.

При крупнокапельном переносе металла происходит значительное разбрызгивание, которое можно уменьшить при погружении дуги в ванну. Оптимальная внешняя составляющая длины дуги, при которой хорошо формируется шов с небольшим разбрызгиванием, равна 2—3 мм.

При применении проволоки, активированной щелочными и щелочноземельными элементами, сварка в CO_2 осуществляется при струйном переносе металла с небольшим разбрызгиванием.

Скорость сварки плавящимся электродом обычно составляет 15—80 м/ч и ее выбирают с учетом как производительности, так и качества формирования шва.

Автоматическая сварка плавящимся электродом позволяет получать качественные соединения на стали толщиной 0,5 мм и выше, полуавтоматическая — на

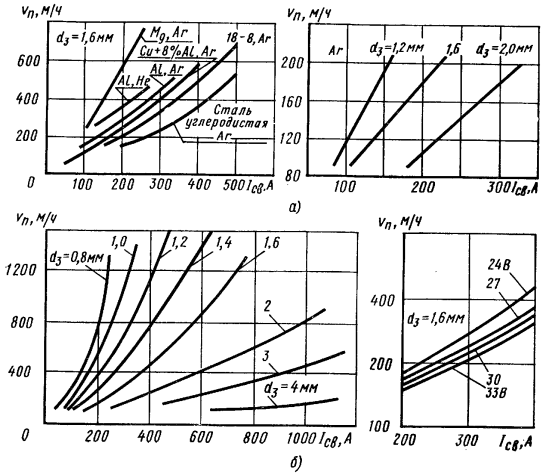


Рис. 97. Зависимость силы сварочного тока от скорости подачи проволоки:

а — при сварке в аргоне и гелии; *б* — при сварке в CO_2 проволокой Св-08Г2С

стали толщиной 1,0 мм и выше. Для очень тонкой стали целесообразно применять в качестве защитного газа смесь Ar — CO_2.

Металл толщиной до 4 мм сваривают без разделки кромок. Для улучшения формирования шва материалы толщиной >2—3 мм сваривают на медной подкладке с канавкой или на остающейся подкладке из основного металла. Для сварки тонколистовых металлов применяют проволоку диаметром 0,5—1,2 мм. Формирование шва на тонколистовом металле происходит лучше при сварке в вертикальном положении сверху вниз.

В соответствии с этим кольцевые швы на тонколистовых изделиях при поворотном стыке рекомендуется сваривать в вертикальном положении сверху вниз или в потолочном положении.

Металлы толщиной 4—12 мм сваривают за два прохода с двух сторон. Металлы толщиной 15—20 мм сваривают за два-три прохода при V-образной разделке кромок с углом 60° и с притуплением 2—4 мм. При толщине 20—30 мм применяют двустороннюю разделку кромок с углом 60° и с притуплением 2—4 мм. Металлы большей толщины целесообразно сваривать при узкой щелевой разделке кромок за несколько проходов.

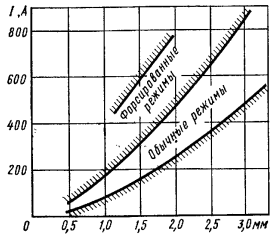


Рис. 98. Зависимость силы тока от диаметра электродной проволоки при сварке в CO_2

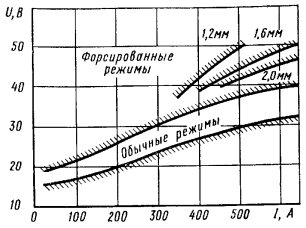
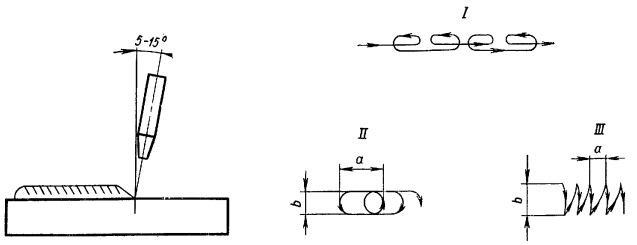


Рис. 99. Зависимость напряжения на дуге от силы тока при сварке в CO_2 проволокой ⌀ 0,5—3,0 мм



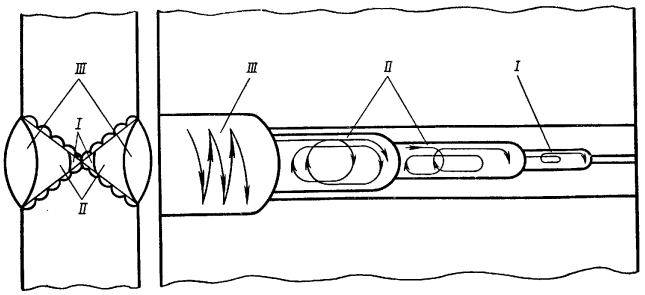


Рис. 100. Схемы перемещения горелки при полуавтоматической сварке стыковых швов в среде защитных газов:

I — возвратно-поступательное; *II* — по вытянутой спирали; *III* — змейкой

Автоматическую сварку стыковых швов в нижнем положении выполняют при вертикальном положении горелки, а сварку угловых швов — при наклоне горелки под углом 25—35° относительно вертикальной стенки с небольшим смещением (до 1 мм) оси электрода на горизонтальную полку.

Полуавтоматическую сварку обычно выполняют при меньшей силе тока по сравнению с автоматической. Металлы толщиной 1—2 мм сваривают без поперечных колебаний электрода. Техника выполнения швов на металлах большей толщины такая же, как и при ручной сварке штучными электродами (рис. 100). Корневые швы при сварке вразделку выполняют при возвратно-поступательном перемещении электрода, средние слои — при перемещении электрода по вытянутой спирали, а верхние слои — при поперечных колебаниях электрода — «змейкой». Полуавтоматическую сварку угловых швов производят с наклоном горелки от вертикальной стенки на 30—45° и наклоном горелки к оси шва «углом назад» на 5—15°.

Сварку в защитных газах плавящимся электродом можно выполнять в различных пространственных положениях, соблюдая при этом приемы, схематически показанные на рис. 101. Металл толщиной до 6 мм сваривают сверху вниз «углом

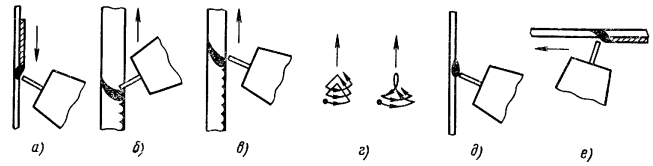


Рис. 101. Схемы расположения и поперечных колебаний электрода при сварке в CO_2 вертикальных швов на стали $\delta < 6$ мм (*а*) и $\delta > 6$ мм (*б*, *в* и *г*) при сварке горизонтальных (*д*) и потолочных (*е*) швов

назад». На металле толщиной до 3 мм поперечные колебания не производят, при большей толщине сварку ведут с поперечными колебаниями электрода. Сталь толщиной > 6 мм сваривают снизу вверх с поперечными колебаниями, как и при сварке штучными электродами.

Горизонтальные швы на стали сваривают в углекислом газе проволоками $d_э = 0{,}8 \div 1{,}4$ мм. Металлы толщиной до 3 мм сваривают без скоса кромок с небольшим зазором. Электрод наклоняют вниз, сварку ведут «углом назад» без поперечных колебаний. Металлы большей толщины сваривают при скошенной кромке верхнего листа, электрод наклоняют вверх. Потолочные швы сваривают проволокой $d_э = 0{,}5 \div 1{,}4$ мм «углом назад» при минимальных значениях силы тока и напряжения и при направлении дуги на ванночку жидкого металла. Сварка на вертикальной стенке и в потолочном положении в среде инертных газов выполняется при струйном переносе металла.

Импульсно-дуговая сварка. Технологические возможности дуговой сварки в защитных газах можно значительно расширить, если применять в качестве источника тепла импульсную (пульсирующую) дугу. Смысл применения импульсной дуги заключается в концентрации во времени теплового и силового воздействия на основной и электродный металл с целью регулирования технологических характеристик процесса сварки. При сварке неплавящимся электродом импульсная дуга предназначена для регулирования процесса проплавления основного металла и формирования шва, при сварке плавящимся электродом — для регулирования процесса расплавления и переноса электродного металла.

Сварка вольфрамовым электродом. При этом процессе дуга пульсирует с постоянным заданным соотношением импульса и паузы (рис.

102). Сплошной шов получают путем расплавления отдельных точек с определенным перекрытием (см. рис. 102, *б*).

Регулярность повторных возбуждений в начале каждого импульса, а также пространственная устойчивость дуги обеспечиваются благодаря горению в промежутках между импульсами и паузами маломощной дежурной дуги (сила тока порядка 10—15% от силы тока в импульсе). При наличии дежурной дуги активное пятно стабилизируется на конце электрода, а дуговой промежуток постоянно поддерживается в ионизированном состоянии.

Дежурная дуга во время паузы не оказывает существенного влияния на глубину проплавления. За счет правильного подбора соотношения токов импульсной и дежурной дуги можно полностью устранить кратеры в точках и, таким образом, уменьшить перекрытие точек и повысить скорость сварки.

Основными параметрами импульсно-дугового процесса сварки являются длительности импульса ($t_и$) и паузы ($t_п$), длительность цикла сварки $T_ц = t_и + t_п$ и шаг точек $S = v_{св}(t_и + t_п)$, где $v_{св}$ — скорость сварки.

За время каждого импульса в изделие вводится количество теплоты, равное

$$Q = q_и t_и,$$

где $q_и$ — эффективная мощность источника тепла во время импульса.

При обычно применяемых режимах импульсно-дуговой сварки при расчете температурного поля за пределами изотерм 800—900° С импульсный источник тепла можно заменить постоянно-действующим средней мощности $q_р = \frac{q_и t_и}{t_и + t_п} = \frac{q_и}{1 + \frac{t_п}{t_и}}$. Средняя расчетная сила тока $I_р = \frac{I_и}{1 - \frac{t_п}{t_и}}$, где $I_и$ — среднее значение силы тока во время импульса.

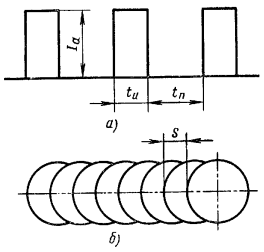


Рис. 102. Схемы процесса сварки импульсной дугой:

а — изменение тока во времени; *б* — формирование шва

Безразмерная величина $G = \frac{t_п}{t_и}$ является одним из технологических параметров, характеризующих проплавляющую способность периодически горящей дуги при заданной энергии импульса и длительности цикла. Эта величина называется жесткостью режима.

В некоторых случаях для характеристики периодической последовательности импульсов пользуются терминологией импульсной техники и применяют термин скважность импульсов $C = \frac{T_ц}{t_и}$, представляющую собой отношение периода следования $T_ц$ к длительности импульса. Используют также коэффициент заполнения $k = \frac{t_и}{T_ц}$ — величину, обратную скважности.

Крайними значениями жесткости режима можно характеризовать способ дуговой сварки. Так, обычная сварка непрерывно горящей дугой характеризуется жесткостью $G = 0$ ($t_и = \infty$ или $t_п = 0$), а дуговая точечная сварка $G = \infty$ ($t_п = \infty$)

Варьируя параметрами импульсного процесса, можно эффективно воздействовать на форму и размеры сварочной ванны, на кристаллизацию металла, на формирование шва, на временные и остаточные деформации и другие показатели процесса сварки. Основой механизма воздействия на эти показатели являются тепловые процессы в зоне сварного шва.

Эффективность расплавления металла при сварке импульсной дугой зависит от скорости распространения тепла. При стесненном теплоотводе при сварке импульсной дугой (тонкой пластины и тем более стержней) полнее используется тепло на расплавление свариваемого металла, чем при сварке постоянной дугой.

При сварке толстого металла с применением большой силы тока дуга при непрерывном горении углубляется в жидкий металл, что приводит к увеличению проплавления основного металла. Поэтому на толстолистовом металле проплавляющая способность импульсной дуги при периодической кристаллизации металла сварочной ванны может оказаться не выше, а в ряде случаев ниже, чем постоянно горящей дуги.

В отношении проплавляющей способности импульсная дуга наиболее эффективна при сварке тонколистовых материалов толщиной 2—3 мм и меньше.

Для анализа тепловых процессов часто используют расчетные данные, так как экспериментальное определение термического цикла при импульсно-дуговой сварке тонколистовых материалов представляет существенные технические трудности.

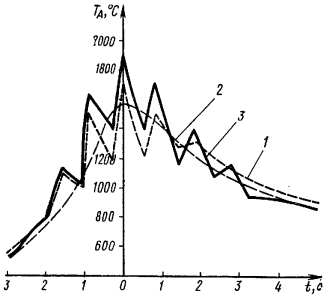


Рис. 103. Термический цикл в точке A, расположенной на расстоянии 0,1 см от оси шва:

1 — экспериментальный; *2* — расчетный по схеме линейного постоянно действующего источника; *3* — расчетный по схеме импульсного нормально-кругового источника (t_0 = 0,45 с). Сталь 18-8 δ = 1,5 мм; $I_д$ = = 100 А; $I_{д.д}$ = 5 А; $t_и$ = 0,21 с; $t_п^в$ = = 0,63 с

В основу тепловых расчетов при импульсно-дуговой сварке положен метод источников, разработанный Н. Н. Рыкалиным. Для упрощения расчетов целесообразно источник тепла рассматривать неподвижным во время импульса с шаговым его перемещением во время паузы. Пользуясь принципом наложения, температуру в любой точке сварного соединения представляют как сумму температур от отдельных тепловых импульсов. При относительно небольших значениях $t_и$ и $t_п$ применительно к тонколистовым материалам такое допущение оправдано. Расчетные данные достаточно близки к экспериментальным, если расчеты проводить по схеме импульсного нормально-кругового источника с постоянной времени t_0 (рис. 103).

Нестационарность температурного поля обусловливается величинами $T_ц$, S и G. Пульсация температуры увеличивается с удлинением $T_ц$ и с приближением к оси шва (рис. 104). При одинаковом цикле пульсация температуры растет с увеличением G до определенного значения, после которого наблюдается снижение нестационарности. При сварке стали толщиной 0,8—1,5 мм наибольшая пульсация имеет место при G = 1÷2. С удлинением $T_ц$ и S, т. е. с ростом нестационарности, увеличиваются скорости охлаждения в области высоких температур. Что касается G, то существуют ее оптимальные значения. Так, при сварке стали типа 18-8 толщиной 1,5 мм максимальные скорости охлаждения имеют место при G = 1,2 ÷ 2. Замена постоянной дуги импульсной дает возможность получать скорости охлаждения в температурном интервале хрупкости (ТИХ) в зависимости от режима сварки в 1,5 раза меньше или в 4 раза больше, чем при обычной аргонодуговой сварке.

Проплавляющая способность импульсной дуги зависит от основных параметров процесса сварки. На рис. 105 показана зависимость погонной энергии q/v, затрачиваемой на проплавление стали типа 18-8 толщиной 1,5 мм, от G при разных значениях $T_ц$ и S. Силу тока устанавливали из условия одинаковой ширины проплавления с обратной стороны шва, равной 2,6—3,0 мм. С увеличением G

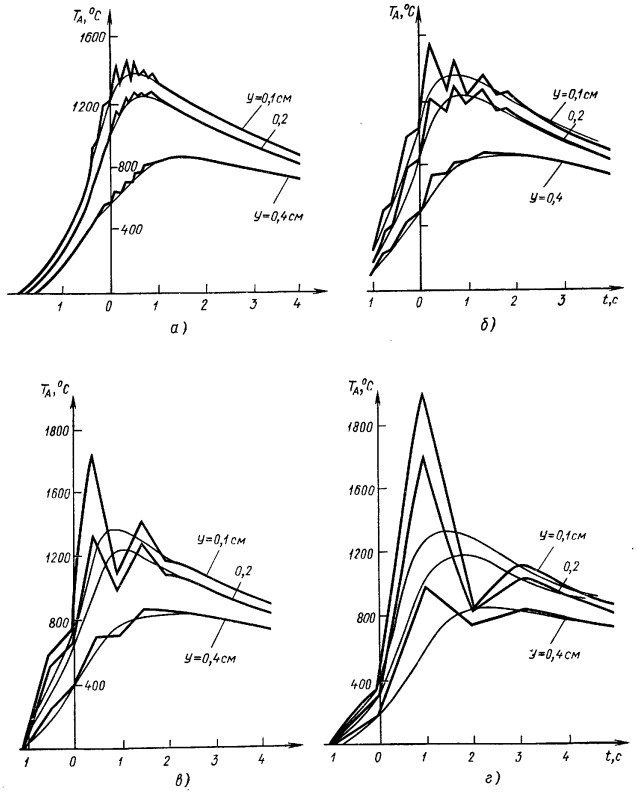


Рис. 104. Термические циклы точек, расположенных на разном расстоянии y от оси шва:

а) $t_и$ = $t_п$ = 0,1 с; б) $t_и$ = $t_п$ = 0,25 с; в) $t_и$ = $t_п$ = 0,5 с; г) $t_и$ = $t_п$ = 1 с. Сталь 18-8, δ = 1,5 мм; $\frac{q}{v}$ = 2 0 кал/см; v = 0,36 см/с; t_0 = 0,45 с

затрата погонной энергии на одинаковое проплавление вначале уменьшается, а затем снова увеличивается. Например, при $S = 1$ мм и $T_ц = 0{,}64$ с $G_{опт} = 1, 2$, а при $T_ц = 2$ с $G_{опт} = 2$. Эффективность проплавления зависит от теплопроводности металла. При одном и том же среднем токе $G_{опт}$ при сварке меди примерно в 2 раза выше, чем при сварке нержавеющей стали.

С уменьшением толщины свариваемого металла $G_{опт}$ повышается. Например, по экспериментальным данным, на пластинах из стали типа 18-8 толщиной 0,4 мм наиболее эффективное проплавление получается при $G_{опт} = 2 \div 4$, а на пластинах толщиной 2 мм — при $G_{опт} = 1 \div 1{,}3$.

Длительность цикла и шаг точек также влияют на проплавление основного металла. Существуют следующие диапазоны $T_ц$ и S, которым соответствует максимальная проплавляющая способность дуги (табл. 38).

Пульсация температуры в зоне сварки обусловливает специфические особенности кристаллизации металла шва при импульсно-дуговой сварке. При этом процессе, в отличие от сварки постоянной дугой, кристаллизация может происходить одновременно по всему контуру ванны. Если применять импульсно-дуговую сварку с шаговым перемещением электрода во время паузы

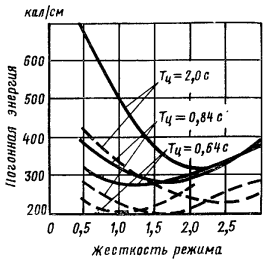


Рис. 105. Зависимость погонной энергии от жесткости режима. Сплошные линии $S = 1{,}0$ мм, штриховые $S = 1{,}8$ мм

38. Рекомендуемые значения $T_ц$ и S, которым соответствует максимальная проплавляющая способность дуги

Сталь	Толщина, мм	$T_ц$, с	S, мм
12Х18Н9Т	0,4	0,2—0,3	1,0—1,2
	0,8	0,4—0,55	1,4—1,6
	2,0	0,5—0,6	2,0—2,4
Амг6	0,45	0,15—0,25	1,0—1,4
	1	0,2 —0,35	1,8—2,0

при неподвижной дуге во время импульса, то форма сварочной ванны приближается к кругу. Схему кристаллизации металла шва можно представить так, как показано на рис. 106. Кристаллиты в соответствии с принципом ортогональности растут в направлении к центру. Если длительность паузы достаточна, то ванна полностью кристаллизуется. При возбуждении дуги следующего импульса происходит расплавление ванны того же размера, что и предыдущая. При этом происходит вторичное расплавление части предыдущей точки. Кристаллизация вновь образованной ванны в начале следующей паузы начинается с пристройки кристаллитов к оплавленным зернам предыдущей точки и основного металла. Степень переплава каждой точки, а также величина максимального угла переориентации, как это видно из схемы на рис. 106, зависит от шага точек.

Часто применяют режимы, при которых импульс дуги начинается тогда, когда еще продолжается кристаллизация ванны от предыдущего импульса. В этом случае кристаллизация предыдущей ванны продолжается во время импульса, когда развивается новая сварочная ванна (рис. 107). Происходит встречное движение изотермы кристаллизации предыдущей точки и изотермы плавления следующей точки.

За счет изменения параметров режима импульсно-дуговой сварки (S, $t_п$ и др.) можно в широких пределах изменять кристаллизацию металла и таким образом влиять на свойства сварных соединений.

Эффективно применение импульсно-дуговой сварки на материалах, склонных к горячим трещинам. Например, опыты с кольцевой пробой на стали ХН38ВТ

толщиной 1,5 мм показали, что при замене сварки постоянной дугой на импульсно-дуговую при $S = 1{,}8$ мм, $T_ц = 0{,}8$ с и $G = 1 \div 2$ показатель стойкости против горячих трещин увеличился в 2—2,5 раза. При применении импульсной дуги значительно повышаются технологические характеристики аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом.

Технологические преимущества импульсной дуги в наибольшей степени проявляются при сварке тонколистовых материалов. Когда шов формируется путем расплавления отдельных точек, сварочная ванна имеет форму, близкую к кругу, сила поверхностного натяжения достигает максимальной величины. При таком процессе каждая застывшая точка является жесткой связью при расплавлении и остывании последующей точки. Поэтому при импульсно-дуговой сварке дефекты формирования шва — провисание и подрезы — практически отсутствуют.

По этой же причине, т. е. благодаря более эффективному использованию

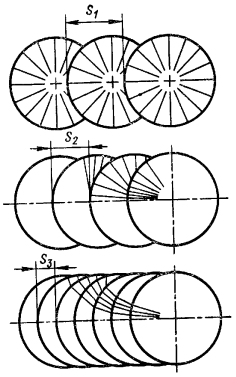


Рис. 106. Схема кристаллизации металла шва при импульсно-дуговой сварке с шаговым перемещением электрода

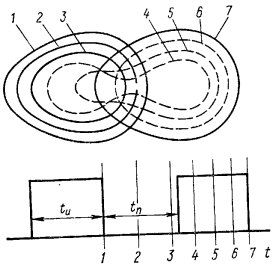


Рис. 107. Изотермы плавления и кристаллизации в период пауза — импульс

поверхностного натяжения металла, при импульсно-дуговой сварке улучшаются условия формирования шва в различных пространственных положениях. Это обусловило широкое применение импульсной дуги при сварке вертикальных, горизонтальных и потолочных швов на металлах широкого диапазона толщин, а также при автоматической сварке неповоротных стыков труб.

При применении импульсной дуги для ручной сварки значительно снижаются требования к квалификации сварщика. Ручной сваркой импульсной дугой легко исправлять дефекты сварных швов. Путем периодического расплавления присадочной проволоки можно заплавлять большие зазоры или прожоги значительных размеров. По сравнению со сваркой постоянной дугой импульсно-дуговая сварка сопровождается меньшими временными и остаточными деформациями изделия в связи с меньшей погонной энергией. Это также способствует повышению стабильности процесса, особенно при сварке тонколистовых материалов.

Основные технологические рекомендации по импульсно-дуговой сварке тонколистовых материалов такие же, как и при сварке постоянной дугой. При выборе режима сварки большое значение имеет шаг точек. Этот параметр следует выбирать в каждом конкретном случае с учетом равномерности формирования шва, достаточного перекрытия точек, чтобы проплавить усадочные кратеры с сопутствую-

щими им дефектами, а также с учетом рациональной схемы кристаллизации, обеспечивающей необходимую технологическую и конструктивную прочность.

В качестве примера в табл. 39 приведены ориентировочные режимы автоматической импульсно-дуговой сварки нержавеющей стали.

39. Режимы автоматической импульсно-дуговой сварки стали типа 18-8

Толщина, мм	$t_и$	$T_ц$	G	$I_и$	$I_{д.д}$	S, мм
	с			А		
0,4	0,04—0,12	0,18—0,34	1—3	40—60	1—4	1,0—1,8
0,8	0,12—0,26	0,36—0,60	1—2	80—140	4—8	1,2—1,8
2,0	0,20—0,38	0,40—0,68	0,8—1,5	160—250	6—10	1,2—2,0
3,0	0,28—0,46	0,44—0,76	0,8—1,2	250—330	8—15	1,5—2,5

Сварка в среде защитных газов импульсной дугой с неплавящимся электродом применяется в ручном и механизированном варианте для выполнения соединений из тонколистовой (до 2—3 мм) нержавеющей, средне- и низколегированной стали, жаропрочной стали и сплавов, алюминиевых, титановых и других сплавов. Весьма эффективно использование импульсной дуги для сварки швов в потолочном, вертикальном и горизонтальном положениях.

Большие возможности импульсно-дуговой сварки открываются в деле улучшения структуры металла шва и соответственно его свойств за счет применения модулированных и высокочастотных импульсов.

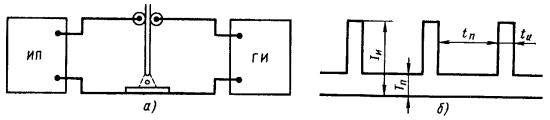


Рис. 108. Схема процесса импульсно-дуговой сварки (*а*) и изменение тока при этом процессе (*б*). *ИП* — источник питания; *ГИ* — генератор импульсов; $t_п$ — длительность паузы; $t_и$ — длительность импульса

Сварка плавящимся электродом. При сварке на основной сварочный ток непрерывно горящей дуги накладываются кратковременные импульсы тока, под воздействием которых происходит ускорение плавления конца электрода, формирование и отрыв капель металла. Схематически сварка импульсной дугой с плавящимся электродом показана на рис. 108.

Поскольку формирование капель и их перенос в основном обусловливаются электродинамической силой, то кратковременные импульсы тока вызывают соответствующее силовое воздействие на жидкий металл электрода с силой, пропорциональной квадрату тока. Однако отрыв капли под воздействием импульса происходит только в том случае, если будет достаточное количество расплавленного металла.

В реальных условиях импульсы тока имеют не прямоугольную, а синусоидальную или экспоненциальную форму. Силу тока во время паузы $I_п$ устанавливают такой, при которой скорость плавления проволоки оказывается меньше скорости ее подачи. В результате за время паузы дуга несколько укорачивается. При наложении импульсов происходит ускоренное плавление электрода с образованием капли и сбрасывание ее в сварочную ванну. Длина дуги при этом увеличивается.

Отрыву капли импульсом тока предшествует расплавление электрода и рост капли. На этой стадии поверхностное натяжение металла намного превышает электродинамическую силу. Однако по мере горения дуги растет объем капли, повышается ее температура и в связи с этим уменьшается поверхностное натяжение. Рост капли прерывается импульсом тока, при котором электродинамическая сила оказывается больше силы поверхностного натяжения.

Частота импульсов тока пропорциональна энергии $W_э$, выделяемой на электроде. Наличие связи между частотой импульсов и параметрами режима сварки позволяет осуществить автоматическое управление и стабилизацию импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом с применением обратных связей по параметрам дуги $I_{св}$, $v_д$, $W_э$. Ввиду сложности процесса формирования и переноса капель металла и многообразия сил, участвующих в этом процессе, для выбора режима сварки приходится пользоваться экспериментальными данными, полу-

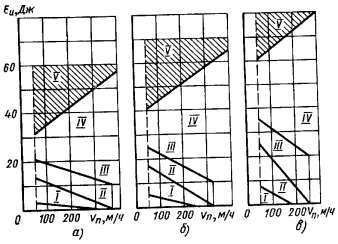


Рис. 109. Характерные диапазоны импульсно-дуговой сварки в аргоне. Проволока Св-АМг6, полярность обратная: *а*) $d_э$ = 1,6 мм; *б*) $d_э$ = 2,0 мм; *в*) $d_э$ = 2,5 мм

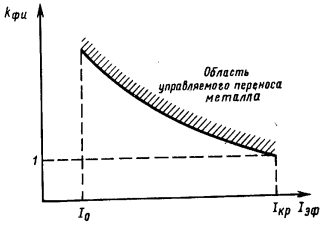


Рис. 110. Зависимость требуемого коэффициента формы кривой силы тока $k_{фи}$ от эффективного тока

ченными главным образом с помощью скоростной киносъемки, совмещенной с осциллографированием.

Наиболее важными параметрами, оказывающими решающее влияние на перенос металла, являются амплитуда и длительность импульса тока, частота импульсов, величина базового тока (ток в промежутках между импульсами). Из всего многообразия вариантов можно выделить следующие пять диапазонов (рис. 109), в которых влияние импульсов на процесс сварки одинаково:

I — импульсы очень малой энергии, плавление проволоки и перенос металла происходят, как при постоянной дуге, однако повышается стабильность дуги на малых токах;

II — энергии импульсов достаточно, чтобы влиять на перенос металла, капля сбрасывается после нескольких импульсов;

III — каждый импульс сбрасывает одну каплю, отрыв происходит в конце импульса;

IV — отрыв капли происходит до окончания импульса, а в оставшееся время импульса электрод интенсивно оплавляется с образованием дополнительно одной или нескольких капель;

V — энергия импульсов настолько велика, что скорость плавления электрода становится намного больше скорости его подачи, процесс сварки нестабилен.

Оптимальным режимом следует считать такой, при котором каждый импульс отрывает каплю; при этом отрыв капли происходит в конце импульса. Если капля отрывается при силе тока, близкой к амплитудной, то перенос металла сопровождается повышенным разбрызгиванием, капли летят с высокой скоростью.

Оптимальный управляемый перенос металла осуществляется при определенном перераспределении энергии в пределах цикла. Это перераспределение можно оценить коэффициентом формы кривой силы тока

$$k_{\text{ф}и} = \frac{I_{\text{кр}}}{I_{\text{ср}}},$$

где $I_{\text{эф}}$ и $I_{\text{ср}}$ — эффективная и средняя силы тока.

Коэффициент формы, необходимый для управляемого переноса металла, зависит от режима сварки (рис. 110). С повышением силы тока перераспределение энергии можно уменьшать, и при $I_{\text{эф}} = I_{\text{кр}}$, когда естественный перенос металла мелкокапельный, сварку можно вести без дополнительных импульсов.

На основании экспериментальных данных коэффициент формы кривой силы тока в обобщенном виде будет

$$k_{\text{ф}и} = m\left(1 - \sqrt{\frac{I_{\text{эф}}}{I_{\text{кр}}}}\right) + \sqrt{\frac{I_{\text{эф}}}{I_{\text{кр}}}},$$

где $I_{\text{кр}}$ — критическая сила тока, соответствующая мелкокапельному переносу металла; m — эмпирический коэффициент.

Коэффициент формы кривой силы тока при наличии исходных данных позволяет рассчитать основные параметры импульсов.

В некоторых случаях, когда нужно повысить скорость полета капель, например при сварке в потолочном и вертикальном положениях, целесообразно накладывать на дугу дополнительные импульсы даже при мелкокапельном естественном переносе металла. Однако частота импульсов не должна быть меньше частоты перехода капель при естественном переносе металла, соответствующем заданной эффективной силе тока.

При наложении на дугу импульсов можно осуществлять мелкокапельный перенос металла при силе тока значительно ниже критической (табл. 40).

40. Минимальные значения силы тока мелкокапельного переноса электродного металла при импульсно-дуговой сварке в аргоне на обратной полярности

Свариваемый материал	Минимальная сила тока, А, для электродов диаметром, мм			
	1,2	1,6	2	2,5
Алюминий АД	20—25	25—30	40—45	60—70
Сплав АМг6	25—30	30—40	50—55	75—80
Медь	40—45	50—70	75—80	90—100
Сталь 06Х19Н9Т	60—70	80—90	100—110	120—130
Титан	80—90	100—110	115—125	130—145
Сталь 08Г2С	90—100	110—120	120—135	145—160

При сварке в аргоне сплавов алюминия, меди, титана, углеродистой и нержавеющей стали удовлетворительный перенос металла при одной капле на импульс обеспечивается при частоте 30 — 100 импульсов в секунду.

При сварке в вертикальном и потолочном положениях для обеспечения сбрасывания капель и формирования шва применяют импульсы большей энергии, чем при сварке в нижнем положении. Импульсы тока способствуют удержанию металла сварочной ванны. Для улучшения удержания сварочной ванны в вертикальном и потолочном положениях необходимо повысить частоту импульсов тока.

Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом занимает важное место в сварочном производстве. Однако область ее применения ограничивается главным образом теми сочетаниями проволоки и защитных газов, при которых возможен мелкокапельный перенос металла. Практически управление переносом металла в дуге осуществимо при сварке в среде инертных газов или их смесей с небольшим количеством многоатомных газов (CO_2, O_2, N_2).

В среде CO_2 импульсы тока не способствуют формированию мелких капель и их направленному переносу при постоянно горящей дуге. Модулирование силы тока может быть полезным при сварке в CO_2 короткой дугой (с короткими замыканиями) для ограничения силы тока в момент разрыва перемычки, соединяющей каплю жидкого металла с электродом, с целью уменьшения разбрызгивания.

Технологические преимущества импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом характеризуются высокой стабильностью процесса, мелкокапельным переносом металла при незначительном разбрызгивании, расширением диапазона рабочих токов, простотой техники сварки швов, расположенных в различных пространственных положениях.

Этот способ сварки пригоден для широкого диапазона толщин свариваемых металлов (1—50 мм). Благодаря высокой пространственной стабилизации дуги и возможности применения вылета электрода большой длины этот процесс может быть успешно применен для сварки стыковых соединений толстолистовых материалов с узкощелевой подготовкой кромок.

Наибольшее применение импульсная сварка плавящимся электродом нашла в производстве сварных конструкций со стыковыми, угловыми и нахлесточными соединениями в вертикальном, горизонтальном и потолочном положениях.

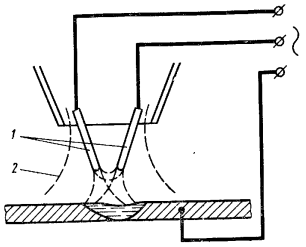


Рис. 111. Схема сварки в среде инертных газов трехфазной дугой с неплавящимися электродами:

1 — вольфрамовые электроды; *2* — струя инертного газа

Специальные способы сварки. Разновидности сварки неплавящимся электродом. *Сварка трехфазной дугой* (рис. 111). К двум вольфрамовым электродам и свариваемому изделию подводится переменный ток от трехфазного источника питания. Одновременно горят три дуги — две между каждым из электродов и изделием и независимая дуга меньшей мощности между электродами. Сварочная ванна защищена струей инертного газа. Одновременное горение трех дуг создает надежную стабильность (без применения осциллляторов) и высокую производительность процесса, так как увеличивает тепловую мощность и плотность теплового потока. Высокая проплавляющая способность трехфазной дуги открывает возможность сварки материалов больших толщин без разделки кромок (для алюминиевых сплавов до 20 мм) за один проход. Расход энергии уменьшается на 20—30%; cos φ установки увеличивается до 0,7.

Эффективный КПД нагрева трехфазной дугой составляет 0,5—0,53.

Благодаря замедленному охлаждению и хорошему рафинированию металл сварного шва имеет высокие механические свойства.

Возможность регулирования мощности отдельных дуг и изменения положения электродов относительно свариваемого стыка позволяет вести от одного и того же источника питания сварку широкого диапазона толщин. При последовательном расположении электродов достигается большая глубина проплавления, при параллельном получаются широкие швы с малой глубиной проплавления. Наибольшее применение сварка трехфазной дугой нашла в производстве конструкций из алюминиевых сплавов.

При разделке кромок сваркой трехфазной дугой можно получать высококачественные стыковые соединения листов алюминиевых сплавов толщиной до 80 мм. При этом затраты на выполнение 1 м шва сокращаются в несколько раз по сравнению с аргонодуговой сваркой плавящимся электродом.

Многодуговая сварка ведется одновременно несколькими независимыми дугами, получающими питание от раздельных источников тока, или от двух фаз трехфазного тока, а также при параллельном или последовательном присоединении электродов к одному источнику питания. Наиболее распространена двухдуговая сварка как в общую, так и в раздельные ванны.

Электроды могут быть расположены как параллельно друг другу, так и под углом. Сварку тавровых соединений можно проводить также встречными дугами.

За счет изменения расположения электродов относительно друг друга и относительно линии свариваемого стыка можно регулировать скорость сварки, форму и размеры шва. При поперечном расположении электродов относительно оси шва получается меньшая глубина проплавления и большая ширина шва. Это позволяет сваривать стыки с несколько пониженными требованиями к точности. При расположении электродов вдоль шва увеличивается глубина проплавления, шов получается более узким. При этом улучшается формирование шва и за счет более медленной кристаллизации ванны уменьшается пористость и улучшается качество металла шва.

Вследствие большой тепловой мощности двухдуговой горелки увеличивается производительность как за счет увеличения в 3—4 раза скорости сварки, так и за счет увеличения до 30 мм толщины материала, который можно сварить за один проход.

Точечная сварка W-электродом. Дуговая точечная сварка в среде защитных газов вольфрамовым электродом применяется для соединения стальных или титановых листовых конструкций с односторонним подходом к месту сварки или для прихватки листов. Соединение получается путем сквозного проплавления верхнего листа и сплавления его с нижней деталью.

Сварка ведется постоянным током прямой полярности от стандартного источника тока горелкой-пистолетом, изолированное сопло которой опирается о свариваемое изделие. Для возбуждения дуги применяется осциллятор. Постоянство времени горения дуги обеспечивается электронным реле времени.

Для получения точек высокого качества (без пор, трещин и подрезов) необходимо обеспечить замедленную кристаллизацию сварочной ванны. Это достигается программированием режима — повторным кратковременным возбуждением дуги или плавным уменьшением сварочного тока. Сварку рекомендуется вести в смеси 40% Ar + 60% He торированным вольфрамовым электродом, заточенным на конце под углом 40—60°. Ориентировочные режимы сварки приведены в табл. 41.

41. Режимы аргонодуговой точечной сварки коррозионно-стойких сталей (без подкладки)

Толщина свариваемого материала, мм	Сила тока, А	Время горения дуги, с	Полный цикл сварки, с	Диаметр ядра, мм	Минимальное разрушающее усилие среза, кгс
0,4—0,4	50—90	0,2—0,3	2	3,0—3,5	150
0,8—0,8	70—120	0,8—1,8	3	4—5	250
1,0—1,5	90—140	2,5—4,0	6—7	6,5—7,5	500
2,0—2,5	100—130	8—16	12—24	9—12	1200

Автоматическая сварка неповоротных стыков труб. Формирование шва при сварке происходит в разных пространственных положениях, что может быть причиной нестабильности формы и размеров шва по периметру стыка. Наиболее стабильное формирование шва получается при сварке неплавящимся электродом.

Сварку неплавящимся электродом проводят как с присадочной проволокой, так и без нее. В качестве примера в табл. 42 приведены режимы сварки неповоротных стыков труб из стали 12Х18Н9Т.

42. Ориентировочные режимы автоматической аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом неповоротных стыков труб

Диаметр трубы и толщина стенки, мм	№ слоя	Сила тока, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Скорость подачи проволок, м/ч	Расход аргона, л/мин
15×3	1	130	10—11	27	—	6—8
	2	140	12—13		31,5	
34×5	1	170—180	10—11	14,5—15	—	8—10
	2	168—178	12		23—25	
	3	165—175	13			
89×5	1	170—180	10—11	12,5—13,5	—	
	2	168—178	12		23—25	
	3	165—175	13			
159×6	1	180—190	10—11	12,5—13,5	—	
	2	177—187	12,0—12,5		24—27	
	3		12—12,5			
	4	177—182	13—14			

Для обеспечения высокого качества сварки, равномерного формирования шва во всех пространственных положениях, получения швов без пор, раковин и подрезов осуществляется программированное управление циклом сварки: скоростью вращения сварочной головки, скоростью подачи присадочной проволоки, изменением силы тока, потока защитного газа.

Для формирования обратного валика корневого шва изнутри трубы применяют подкладные под стык кольца (остающиеся или съемные).

Защита обратной стороны шва от взаимодействия с воздухом осуществляется подачей газа под стык через дренажные отверстия в подкладных кольцах или подачей защитного газа внутрь трубопровода. Вместо поддува аргоном изнутри для защиты металла шва можно использовать специальные пасты, наносимые заранее на кромки. Образующаяся при этом на шве корка легко отделяется после остывания.

При малой толщине стенки (до 2,5 мм) обеспечивается равномерное формирование шва во всех пространственных положениях. При большой толщине стенки вес сварочной ванны превышает силы поверхностного натяжения и силового воздействия дуги, что ухудшает формирование шва, и может появиться вогнутость в околопотолочном положении или излишнее провисание в нижнем положении.

Одним из способов принудительного воздействия на формирование шва является способ формирующего давления. На стыке, подлежащем сварке, устанавливают снаружи или изнутри съемную камеру, в которой создают избыточное или недостаточное (по отношению к атмосферному) давление. Формирующее давление по периметру шва изменяют по определенной программе таким образом, чтобы оно противодействовало силам, нарушающим равномерность заданного проплавления.

Для труб из нержавеющей стали, имеющих толщину стенки до 3 мм, можно применять сварку способом автоопрессовки, при котором стык без разделки кромок, сваренный за первый проход без присадочной проволоки, многократно прогревается без применения внешнего осевого усилия дугой при меньшей погонной энергии, чем при сварке. В результате многократного прогрева возникает усиление шва.

Высокое качество с равномерным формированием шва получается при сварке неповоротных стыков труб импульсной дугой с неплавящимся электродом.

Сварка дугой, управляемой магнитным полем. Наложением внешнего магнитного поля можно управлять дугой. Поперечное поле (магнитные линии перпендикулярны оси шва и электрода) или параллельное поле (магнитные линии параллельны направлению сварки) вызывает перемещение дуги соответственно вдоль или поперек шва. Продольное поле (магнитные линии параллельны оси электрода) вызывает вращение дуги.

Магнитное управление дугой позволяет увеличить скорость сварки, уменьшить зону перегрева и повысить пластичность металла, управлять процессом дутья дуги и добиться хорошего формирования шва, управлять микроструктурой путем электромагнитного перемешивания сварочной ванны. Управление дугой при помощи магнитного поля облегчает сварку деталей малых толщин. Применение поперечных колебаний дуги уменьшает скорость охлаждения шва, что особенно важно при сварке закаливающейся высокопрочной стали, улучшает и стабилизирует пластические свойства сварных соединений, улучшает структуру металла шва, уменьшает склонность к образованию холодных трещин.

При сварке в пульсирующем режиме или в знакопеременном магнитном поле титана, алюминиевых и магнитных сплавов отмечено измельчение структуры, а также положительное влияние магнитного поля на химический состав металла шва и структуру околошовной зоны.

Эффективно применение дуги, вращаемой магнитным полем, при сварке стыковых швов замкнутого контура (труб между собой и с фланцами или сильфонами, кольцевых швов сосудов, при приварке труб к трубным решеткам и т. п.).

В качестве неплавящегося электрода применяют медный электрод, охлаждаемый водой. Скорость вращения дуги составляет десятки метров в секунду. Сварное соединение получается в результате постепенного расплавления свариваемых кромок при многократном нагреве высокоскоростной дугой и в большинстве случаев с применением осадки.

43. Режимы сварки труб из стали 12Х18Н10Т дугой, вращаемой в магнитном поле

Размер трубы, мм	Сила тока, А	МДС, А	Время сварки, с
6×1,0	55—60	2000—2200	1,0
10×1,0	70—80	1650—1750	1,5
24×1,0	110—120	1400—1550	4,0
65×1,0	125—130	1100—1350	10,0

Примечание. Расход аргона на головку 6—8 л/мин, на поддув 2—3 л/мин.

Г. В. Волчков разработал способ сварки дугой, вращаемой в магнитном поле с малой скоростью (табл. 43). Процесс сварки осуществляется без применения осадки за один оборот дуги. Область малых скоростей вращения дуги зависит от материала электрода. Наиболее широкая область присуща дугам с катодами, имеющими высокие термоэмиссионные свойства (вольфрам лантанированный ВЛ и торированный ВТ). Скорость вращения дуги в этой области зависит от тока, магнитной индукции, длины дуги, состава и расхода защитного газа.

Сварка с применением горячей присадочной проволоки. Способ сочетает высокое качество сварки вольфрамовым электродом с высокой скоростью сварки плавящимся электродом и обеспечивает высокую производительность и качество.

Присадочная проволока нагревается переменным током от независимого источника питания до температуры, близкой к точке плавления, и при контакте со сварочной ванной немедленно расплавляется.

Применение горячей проволоки резко увеличивает производительность сварки и уменьшает пористость наплавленного металла, так как происходит дегазация проволоки и удаление летучих включений — особенно водорода.

По сравнению с обычным способом сварки стыкового соединения без скоса кромок на медной подкладке с формирующей канавкой применение горячей присадочной проволоки повышает скорость сварки при толщине металла 1,6 мм на 30%; 2,4—3,2 мм — на 100%; 4,8—6,4 мм — на 40—70%.

При производстве наплавочных работ с подогревом присадочной проволоки производительность увеличивается в 3—4 раза по сравнению с наплавкой холодной проволокой.

Дуговую сварку с подогревом присадочной проволоки применяют для стали толщиной 1,6—50 мм в тех случаях, когда требуется большая производительность процесса, например в производстве труб, резервуаров и других изделий из углеродистой и коррозионно-стойкой стали.

Атомно-водородная сварка. Основной и присадочный металл расплавляется за счет тепла электрической дуги между двумя вольфрамовыми электродами и рекомбинации водорода, диссоциированного в столбе дуги (рис. 112). Тепловой эффект сгорания молекулярного водорода в наружной зоне пламени и тепловое излучение дуги по сравнению с термическим эффектом рекомбинаций незначительны. Температура веерообразного атомно-водородного пламени составляет около 3700° С. По степени концентрации тепла атомно-водородная сварка занимает промежуточное положение между кислородно-ацетиленовой сваркой и сваркой вольфрамовым электродом в среде инертных газов.

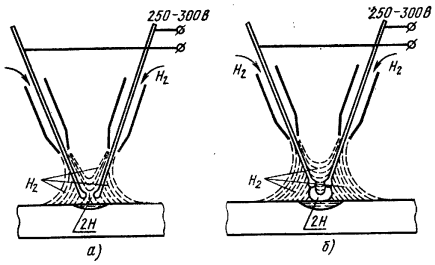


Рис. 112. Схема процесса атомно-водородной сварки:

а — «спокойная» дуга; *б* — «звенящая» дуга

Химическая активность водорода в молекулярном и особенно атомарном состоянии способствует эффективной защите расплавленного металла от взаимодействия с воздухом и обеспечивает высокую чистоту наплавленного металла.

Независимая дуга питается от трансформатора с напряжением холостого хода 250—300 В. При силе сварочного тока больше 35 А можно использовать трансформатор с U_{xx} = 220 В. Рабочее напряжение на дуге составляет 60—100 В. Высокое рабочее напряжение обусловливается охлаждающим действием эндотермической реакции диссоциации водорода, а также высоким потенциалом ионизации этого газа.

В зависимости от мощности дуги, расхода газа и расстояния между электродами дуга может быть «спокойной» или «звенящей». Звенящая дуга имеет форму веера, издает резкий звук и характеризуется большей мощностью, чем спокойная.

Атомно-водородная сварка обеспечивает получение плотных швов с высокой прочностью и пластичностью, с чистой и гладкой поверхностью на низкоуглеродистой и легированной стали, на чугуне и других сплавах.

Применение этого процесса ограничено из-за его сложности, трудности механизации и низкой производительности сварки металла средних и больших толщин.

Сварка в CO_2 угольным электродом. Тонколистовую сталь можно сваривать дугой с угольным электродом в среде углекислого газа. Поток углекислого газа направляется в зону сварки концентрично относительно электрода. Сварка осуществляется постоянным током прямой полярности. Внешняя характеристика

источника питания должна быть крутопадающей с напряжением холостого хода не ниже 65—70 В.

Этот способ сварки применяется для бортовых швов на стали толщиной до 1,5—2 мм. При этом можно получать швы с хорошим формированием во всех пространственных положениях. При сварке низкоуглеродистой стали на прямой полярности науглероживание металла отсутствует.

Сварка угольным электродом в среде углекислого газа в ряде случаев может с большим технико-экономическим эффектом заменить ацетилено-кислородную сварку на изделиях из тонколистовой низкоуглеродистой стали.

Разновидности сварки плавящимся электродом. *Сварка с принудительным формированием шва.* Вертикальные швы на металлах большой толщины можно сваривать в защитных газах с принудительным формированием с помощью охлаждаемых ползунков (рис. 113). При сварке стали в среде углекислого газа для улучшения формирования и качества металла шва на поверхности ванны разводят небольшое количество шлака за счет подачи флюса или применения порошковой проволоки. Для получения шва требуется меньший зазор между свариваемыми кромками, чем при электрошлаковой сварке (12—14 мм вместо 22—24 мм). Поэтому этот процесс более производительный и экономичный применительно к стали толщиной 8—40 мм.

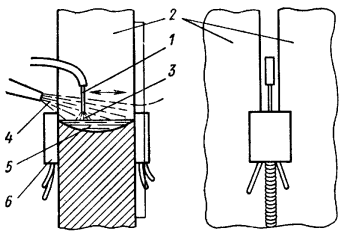


Рис. 113. Схема сварки вертикальных и наклонных швов с принудительным формированием:

1 — электродная проволока; *2* — свариваемые детали; *3* — сварочная дуга; *4* — защитный газ; *5* — сварочная ванна; *6* — формирующие ползунки

Сварка порошковой проволокой. При наличии в проволоке щелочных, щелочноземельных элементов и окислов титана перенос металла в непрерывно горящей дуге в среде углекислого газа переходит от крупнокапельного к средне- и мелкокапельному. При этом значительно уменьшается разбрызгивание металла. Указанные активирующие вещества вводят в сердечник порошковой проволоки. В состав порошковых проволок, применяемых для сварки в CO_2, входят шлакообразующие материалы, раскислители и легирующие элементы.

В СССР применяют порошковые проволоки, разработанные в ИЭС им. Е. О. Патона. Они разделяются по составу сердечника на два типа: рутиловые (марок ПП-АН8, ПП-АН10 и ПП-АН13) и рутил-флюоритные (марок ПП-АН4, ПП-АН9 и ПП-АН18). Проволоки первого типа применяют для сварки швов, к которым предъявляются повышенные требования к внешнему виду, проволоки второго типа — для швов в конструкциях ответственного назначения с тяжелым режимом работы при низкой температуре.

Сварку порошковой проволокой в углекислом газе применяют главным образом вместо ручной дуговой сварки штучными электродами и реже вместо сварки под флюсом и в CO_2 проволокой сплошного сечения.

Сварка под водой. Трудности сварки под водой обусловливаются большей концентрацией водорода в газовом пузыре, окружающем дугу и сварочную ванну. Водород ухудшает стабильность горения дуги и вызывает поры и трещины в металле шва. Парциальное давление водорода уменьшают вдуванием в зону сварки других газов, созданием окислительной атмосферы и введением в зону сварки галоидных соединений — фторидов и хлоридов.

Хорошие швы получаются при подводной сварке в углекислом газе и в смеси CO_2—O_2.

Многоэлектродную сварку, или сварку расщепленными электродами, ведут двумя и более плавящимися электродами, электрически связанными друг с другом и получающими питание от общего источника. Подавая в зону дуги проволоки различного состава, можно легировать металл шва в нужном направлении. Изменяя расстояние между электродами и их расположение относительно стыка, можно регулировать проплавление основного металла.

При последовательном расположении вдоль стыка двух электродов можно увеличить скорость сварки примерно в 1,5 раза. При поперечном расположении электрода относительно стыка швов получается шире, с меньшей глубиной проплавления. При этом можно несколько снизить требования к точности сборки.

Многоэлектродная сварка плавящимся электродом является эффективным средством улучшения формирования шва и устранения пористости в металле шва. Этот способ находит применение при сварке труб и листовых конструкций, собранных с изменяющимся зазором, а также при производстве наплавки.

Сварка электрозаклепками. Дугой с плавящимся электродом в среде защитных газов можно приварить к деталям листы толщиной до 8 мм. Соединять можно листы из низкоуглеродистой и легированной стали, нержавеющих, жаропрочных и алюминиевых сплавов. Для сварки в верхнем листе просверливают или пробивают отверстие. Сварку ведут с подачей электродной проволоки, время горения дуги задают в соответствии с условиями сварки. Сталь сваривают в среде аргона с примесью 1—2% кислорода дугой прямой полярности, в среде CO_2 — дугой обратной полярности. Алюминий сваривают на обратной полярности в среде аргона или смеси Ar—He.

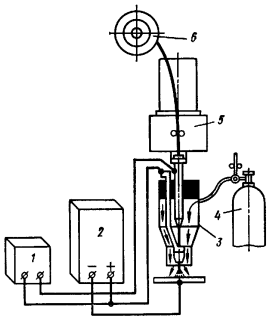


Рис. 114. Схема газоэлектрической сварки предварительно подогреваемой электродной проволокой:

1 — низковольтный трансформатор; *2* — сварочный источник; *3* — горелка; *4* — баллон; *5* — подающий механизм; *6* — катушка

Сварка с дополнительным нагревом проволоки. Повышение производительности процесса наплавки, помимо I^2R-нагрева проволоки на вылете, можно обеспечить за счет предварительного подогрева проволоки до контактного мундштука от отдельного низковольтного трансформатора (рис. 114). При таком нагреве проволоки сохраняется стабильность дуги, в 1,5—2 раза повышается скорость плавления проволоки. Перенос металла в дуге происходит как и при сварке с неподогретым электродом. При сварке в аргоне струйный перенос металла в случае подогрева проволоки наступает при критической силе тока на 15—17% меньше, чем без подогрева. Этот процесс может быть рекомендован для наплавочных работ в среде аргона и углекислого газа, а также для сварки стали толщиной $\geqslant$ 2 мм, когда требуется высокая производительность процесса.

ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ СВАРКА

Сущность процесса. Электрошлаковая сварка — принципиально новый способ соединения металлов, разработанный коллективом Института электросварки им. Е. О. Патона АН УССР, — выдающееся достижение отечественной сварочной науки и техники пятидесятых годов нашего столетия.

В отличие от других способов сварки плавлением при электрошлаковой сварке источником нагрева служит тепло, выделяющееся в ванне расплавленного флюса при прохождении через нее тока от электрода к изделию.

Электрошлаковая сварка нашла применение при изготовлении конструкций из стали различных классов и марок, никелевых сплавов, титана, алюминия, меди и сплавов на их основе. Диапазон свариваемых толщин 8—2500 мм. В принципе электрошлаковым процессом можно соединять металл неограниченной толщины.

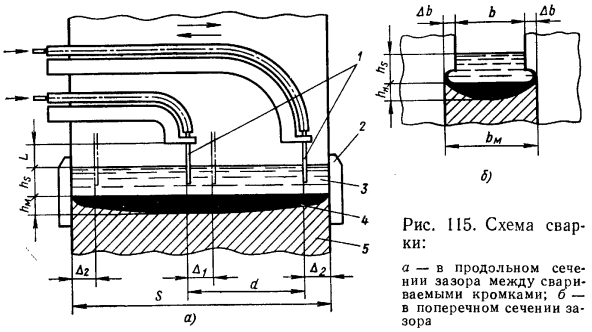


Рис. 115. Схема сварки:

а — в продольном сечении зазора между свариваемыми кромками; *б* — в поперечном сечении зазора

Электрошлаковая сварка послужила основой для разработки ряда новых технологических процессов, выходящих за рамки сварочного производства: электрошлаковая подпитка слитков и отливок, уменьшающая в несколько раз расход металла на прибыли; электрошлаковый переплав, резко улучшающий качество металла по сравнению с мартеновским и конверторным того же состава; электрошлаковая отливка.

Описание процесса (рис. 115). Шлаковая ванна *3* образуется в результате расплавления сварочного флюса и находится в расплавленном состоянии в течение всего процесса сварки. Сварочный ток, проходя через шлаковую ванну *3* между погруженными в нее электродами *1* и металлической ванной *4*, поддерживает высокую температуру и электропроводность шлака. Объем и глубину шлаковой ванны сохраняют, как правило, постоянными. Для этого зазор между свариваемыми кромками закрывают с боков формирующими водоохлаждаемыми устройствами *2* (ползунами, накладками) или остающимися стальными пластинами. Металлическая ванна *4*, кристаллизуясь, образует сварной шов *5*.

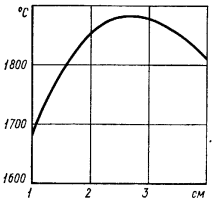


Рис. 116. Изменение температуры шлаковой ванны по глубине при общей ее глубине h_s

При электрошлаковой сварке большая часть тепла выделяется в шлаковой ванне. Вместе с тем часть электрической энергии превращается в тепловую в вылете электрода — на том его участке, который выступает за контактные точки токоподводящего устройства. Выделение тепла в самой шлаковой ванне неравномерно в разных ее частях. Это объясняется прежде всего тем, что в шлаковой ванне электрический ток протекает между электродом и металлической ванной по усеченному конусу с основанием на металлической ванне и вершиной на электроде.

Другая причина указанного явления состоит в том, что температура шлака не одинакова по глубине ванны. Она наименьшая на поверхности шлаковой ванны

и наибольшая вблизи торца погруженного в шлак электрода. Неравномерность температуры шлака настолько велика, что ее не выравнивает интенсивная конвекция (рис. 116). В обратной зависимости от температуры находится активное сопротивление шлаковой ванны.

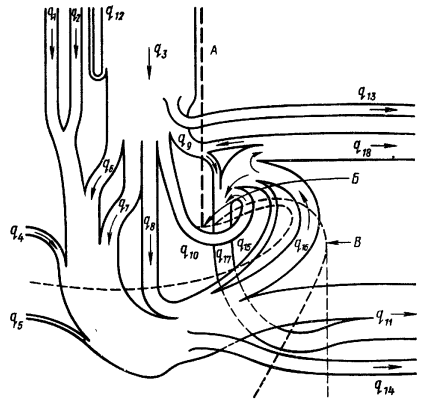
Полную тепловую мощность электрошлакового процесса определяют по формуле

$$P_с = U_с I_с,$$

где $U_с$ — суммарное падение напряжения на вылете электрода и в шлаковой ванне (напряжение сварки); $I_с$ — сварочный ток.

Рис. 117. Схема тепловых потоков:

q_1 и q_2 — тепло, выделяемое в омическом сопротивлении электрода между точкой токоподвода и местом плавления (для удобства измерения его разделяют на тепло q_1, выделяемое в сухом вылете, и тепло q_2, выделяемое в погруженной части электрода); q_3 — тепло, выделяемое в шлаковой ванне при прохождении через нее тока, являющееся основной статьей приходной части теплового баланса шлаковой ванны и общего баланса; q_4 и q_5 — тепло, выделяемое соответственно в расплавленном металле при замыкании электрода с металлической ванной через капли и в сопротивлении растекания металлической ванны; q_6 — тепло, поступающее в электрод от шлаковой ванны путем теплопередачи; q_7 — тепло, поступающее в расплавленный металл (в капли) во время его переноса через шлаковую ванну; q_9 — тепло, передаваемое от шлаковой ванны в металлическую ванну; q_9 — тепло, передаваемое шлаком основному металлу выше места начала плавления кромок (между уровнями *А* и *Б*); q_{10} — тепло, передаваемое основному металлу через оплавляемые кромки выше уровня начала кристаллизации, т. е. уровня максимальной ширины изотермы плавления (между уровнями *Б* и *В*); q_{11} — тепло, передаваемое через закристаллизовавшийся металл к основному металлу ниже уровня начала кристаллизации (ниже уровня *В*); q_{12} — потери тепла на излучение с поверхности шлаковой ванны; q_{13} — отвод тепла в ползуны от шлаковой ванны; q_{14} — отвод тепла в ползуны от шва и основного металла; q_{15} и q_{16} — тепло, поступающее от металлической ванны к расплавляемому металлу через шлак и соответственно кружным путем, через металл; q_{17} — тепло, выделяющееся при кристаллизации расплавленного основного металла; q_{18} — тепло, рассеивающееся в основном металле выше уровня плавления и не участвующее в плавлении кромок



При установившемся процессе сварки количество теплоты, выделяемой в шлаковой ванне, должно быть равно количеству теплоты, отдаваемой ванной. Расходная часть теплового баланса слагается из расхода теплоты на плавление электродного и основного металлов и флюса, на теплоотвод в массу основного металла и в формирующие устройства, а также излучение от зеркала шлаковой ванны. В качестве примера на рис. 117 по данным Г. З. Волошкевича приведена схема теплового баланса для случая электрошлаковой сварки металла толщиной 100 мм. Повышенный по сравнению с дуговой сваркой отвод тепла в основной металл обусловливается меньшей концентрацией нагрева, свойственной электрошлаковому процессу. Это явление представляется для большинства случаев сварки нежелательным, так как вызывает увеличение длительности пребывания металла

шва и околошовной зоны выше температуры интенсивного роста первичного зерна (для стали — выше Ac_3) и тем самым приводит к перегреву металла и ухудшению механических свойств.

При толщине свариваемого металла <300 мм увеличивается доля тепла, теряемого на теплоотвод в формирующие устройства. В связи с этим при электрошлаковой сварке металла относительно малой толщины (<50 мм) существенно уменьшается перегрев основного металла и, следовательно, повышаются механические свойства сварного соединения.

Использование энергии для плавления электрода при электрошлаковой сварке более эффективно, чем при электродуговой сварке. Об этом свидетельствует меньшее количество энергии, расходуемой на расплавление равного количества электродной проволоки при электрошлаковой сварке по сравнению с электродуговой сваркой под флюсом и в струе углекислого газа (рис. 118). Указанную закономерность можно объяснить следующим.

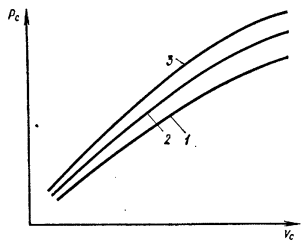


Рис. 118. Энергия P_c, выделяемая при электрошлаковой сварке (*1*), сварке в углекислом газе (*2*) и дуговой сварке под флюсом (*3*) в зависимости от скорости v_c подачи электродной проволоки при постоянном ее диаметре

При электрошлаковой сварке нет необходимости расплавлять вместе с электродом все новые и новые порции сварочного флюса, так как заданное количество флюса расплавляют только в начале процесса. В дальнейшем объем шлаковой ванны сохраняют постоянным.

Параметры режима электрошлаковой сварки и их влияние на размеры и форму металлической ванны приведены на рис. 115. Влияние параметров режима при вертикальной электрошлаковой сварке на размеры и форму металлической ванны изучено достаточно подробно (табл. 44). Установлено, что при увеличении силы сварочного тока (и соответственно — скорости подачи электродов) ширина металлической ванны $b_м$ вначале увеличивается, а затем уменьшается. Максимальная ширина металлической ванны зависит от соотношения толщины свариваемого металла, зазора между свариваемыми кромками и параметров режима сварки. Уменьшение ширины металлической ванны связано с двумя процессами. Во-первых, устанавливается динамическое равновесие между количеством тепла, поступающего к свариваемым кромкам от перегретой металлической ванны, и количеством тепла, усваиваемого основным металлом. Во-вторых, увеличение скорости подачи электродной проволоки, а следовательно, и скорости сварки, опережает увеличение мощности процесса (см. рис. 118), вследствие чего погонная энергия сварки P_c/v_c уменьшается.

Глубина металлической ванны с увеличением силы тока увеличивается монотонно. При определенном значении силы тока глубина металлической ванны становится критической, и в сварном шве могут появиться кристаллизационные трещины.

Причина таких трещин состоит в том, что при глубокой металлической ванне коэффициент формы ванны ψ становится меньше допустимого, кристаллиты шва с обеих оплавленных кромок растут встречно к центру шва и соединяются там, образуя плоскость слабины. Это место шва обладает наименьшей пластичностью в температурном интервале хрупкости, и вследствие деформаций растяжения при охлаждении шва и околошовной зоны здесь происходит образование несплошности — кристаллизационной трещины (рис. 119). Допустимая величина коэффициента формы ванны ψ_1, а следовательно, и допустимая величина силы сварочного тока I_c зависят от нескольких факторов: толщины свариваемого металла, его химического состава и состава сварочных материалов, жесткости закрепления деталей.

44. Влияние параметров режима при вертикальной электрошлаковой сварке на размеры и форму шва

Параметры размеров шва	Параметры режима сварки (изменение в сторону увеличения)			
	Скорость подачи электрода v, м/ч, и ток I, А		Толщина металла на электрод δ/n	Напряжение сварки U_c
	$v < 200$ $I < 400$	$v > 200$ $I > 400$		
Глубина металлической ванны $h_м$	Увеличивается		Уменьшается	Незначительно увеличивается
Ширина металлической ванны $b_м$	Увеличивается	Уменьшается	Незначительно уменьшается	Увеличивается
Коэффициент формы ванны $\psi = \frac{b_м}{h_м}$	Незначительно уменьшается		Увеличивается	
Доля основного металла в металле шва γ, %	Незначительно увеличивается		Незначительно уменьшается	

Параметры размеров шва	Параметры режима сварки (изменение в сторону увеличения)			
	Скорость поперечного перемещения электрода $v_п$	Глубина шлаковой ванны h_s	Вылет электрода L	Зазор между кромками b
Глубина металлической ванны $h_м$	Не изменяется	Незначительно уменьшается	Уменьшается	Не изменяется
Ширина металлической ванны $b_м$	Уменьшается	Уменьшается	Не изменяется	Увеличивается
Коэффициент формы ванны $\psi = \frac{b_м}{h_м}$			Незначительно увеличивается	
Доля основного металла в металле шва γ, %			Не изменяется	

На практике величина $\psi = 1{,}25 \div 10$ (среднее значение 1,5—4). Верхний предел соответствует наиболее неблагоприятным условиям сварки: большой толщине свариваемого металла (более 500 мм), жесткому закреплению, повышенному содержанию углерода в основном металле (более 0,21%) и т. д.

Зависимость коэффициента ψ от силы тока определяют опытным путем. Допустимая сила тока ограничивает и допустимую скорость сварки, поскольку по-

следняя прямо зависит от силы тока. Практически установлено, что из условия технологической прочности (предотвращения кристаллизационных трещин) скорость электрошлаковой сварки металла относительно малых толщин (менее 50 мм) не должна превышать 4 м/ч, относительно больших толщин (более 100 мм) — 0,5 м/ч.

Увеличение сварочного напряжения вызывает увеличение ширины металлической ванны. Наоборот, при уменьшении напряжения ниже определенного значения ширина металлической ванны может стать меньше ширины зазора между кромками, и образуется непровар. Глубина металлической ванны с изменением напряжения U_c изменяется незначительно. С увеличением ширины зазора между свариваемыми кромками ширина металлической ванны увеличивается, а глубина не изменяется. С увеличением глубины шлаковой ванны ширина металлической

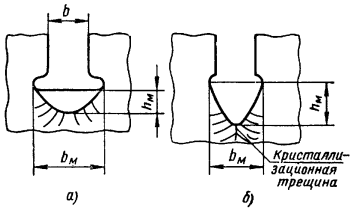


Рис. 119. Образование кристаллизационных трещин в металле шва в зависимости от коэффициента формы металлической ванны

а) $\psi > 1{,}25$; *б*) $\psi < 1{,}25$

ванны уменьшается. В практике сварки глубина шлаковой ванны находится в пределах 30—70 мм. В зависимости от соотношения $v_c n/\delta$ при вылете 70 мм, зазоре 24 мм и скорости возвратно-поступательного перемещения электродов вдоль зазора 40 м/ч глубина шлаковой ванны рекомендуется следующая:

Отношение $v_c n/\delta$, м/ч·мм	1	1,5	2	3	4	5
Глубина шлаковой ванны, мм	35	40	45	50	55	60

Глубина металлической ванны с увеличением глубины шлаковой ванны незначительно уменьшается. С увеличением числа электродов ширина шва заметно увеличивается, что объясняется увеличением мощности и рассредоточением источника нагрева по толщине свариваемых кромок. Увеличивается и глубина металлической ванны.

С увеличением скорости возвратно-поступательного перемещения электродов вдоль зазора между кромками ширина уменьшается, однако чем больше скорость подачи электродов, тем большей, при прочих равных условиях, может быть скорость колебаний, не вызывающая появления непроваров. С увеличением скорости перемещения электродов и длительности их остановок в крайних положениях кромки оплавляются равномернее, с меньшими характерными уширениями ванны посредине ее длины и сужениями вблизи формирующих устройств.

Дополнительные параметры режима сварки воздействуют на размеры и форму металлической ванны следующим образом. С увеличением диаметра электрода при прочих постоянных параметрах незначительно уменьшается глубина металлической ванны и увеличивается ее ширина. Влияние вылета электрода определяется его подогревом при прохождении тока. С увеличением вылета электрода уменьшается при постоянной скорости подачи сила сварочного тока. Вследствие этого ширина и глубина металлической ванны заметно уменьшаются. Подобным образом действует дополнительный подогрев электрода током от постороннего источника. Увеличение скорости подачи электрода действует аналогично увеличению силы тока. Увеличение расстояния между электродами действует обратно увеличению их числа.

Уменьшение минимального расстояния Δ_2, на которое электрод приближается к формирующему устройству при возвратно-поступательном перемещении вдоль зазора между свариваемыми кромками, способствует выравниванию ширины и глубины металлической ванны вблизи формирующих устройств и уменьшает тенденцию роста кристаллов к центру шва благодаря рассредоточению источников тепла и смещению его частей к формирующим устройствам. Технологический прием, заключающийся в размещении электродных проволок вблизи формирующих устройств, позволил существенно повысить скорость сварки.

Помимо коэффициента формы ванны, характеристикой формы шва служит высота усиления шва. Она зависит от величины углубления в формирующих канавках ползунов или накладок и принимается равной 1,5—2,0 мм при сварке изделий без последующей механической обработки и 8—10 мм при необходимости последней.

Условия устойчивости электрошлакового процесса. Электрошлаковый процесс протекает одинаково устойчиво как на постоянном, так и на переменном токе. Он устойчив в весьма широком диапазоне плотности тока (0,2—250 А/мм²). Высокая устойчивость электрошлакового процесса обусловлена прежде всего большой тепловой инерцией шлаковой ванны.

Специфичность среды, в которой протекает процесс, накладывает на него определенные ограничения.

Устойчивость электрошлакового процесса обусловливается факторами, которые могут быть отнесены к двум категориям: первая охватывает условия протекания электрических и тепловых процессов в шлаковой ванне; вторая касается плавления электрода.

Электрошлаковый процесс будет устойчивым, если он в течение значительного времени существует непрерывно при заданных значениях тока и напряжения. Естественно поэтому заключить, что одним из основных условий устойчивости ЭШС является сохранение постоянства напряжения сварки при заданной силе тока. Графически это условие выражается пересечением вольт-амперных характеристик шлаковой ванны, источника питания и сварочной головки в заданной точке, соответствующей параметрам режима сварки (рис. 120).

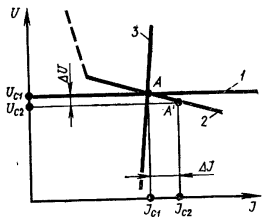


Рис. 120. Вольт-амперные характеристики:

1 — источника питания; *2* — шлаковой ванны; *3* — сварочной головки

Вольт-амперная характеристика шлаковой ванны *2* представляет собой падающую кривую, характер которой обусловливается резкой зависимостью проводимости шлака от его температуры.

Вольт-амперная характеристика источника тока *1* может быть возрастающей, жесткой, пологопадающей и крутопадающей. Характеристика источника тока принимается в зависимости от различных факторов: диаметра электрода или площади его поперечного сечения, мощности процесса, необходимости регулировать температуру шлаковой ванны и т. д. На рис. 120 приведена жесткая вольт-амперная характеристика источника тока.

Вольт-амперная характеристика сварочной головки с постоянной скоростью подачи электрода (при электрошлаковой сварке применяется в настоящее время только такой тип головок) имеет вид прямой *3*, которая означает почти постоянную величину тока при данной скорости подачи электрода в широком диапазоне напряжений на шлаковой ванне.

Точка *A* определяет устойчивый режим электрошлаковой сварки: напряжение U_c и силу тока I_c. Уменьшение напряжения шлаковой ванны, свидетельствующее, в частности, об уменьшении расстояния от торца электрода до метал-

лической ванны, вызывает кратковременное увеличение тока ΔI. В результате скорость плавления электрода увеличивается, а напряжение U_{cl} шлаковой ванны восстанавливается. При увеличении напряжения шлаковой ванны происходит обратный процесс.

Другим возмущением является возможность появления дугового разряда между электродом и свободной поверхностью шлаковой ванны либо в глубине шлаковой ванны между электродом и металлической ванной. Такой разряд, как правило, неустойчив, но его появление может привести к образованию дефектов сварного шва. Для предупреждения дугового разряда сварку нужно вести в условиях, противоположных условиям, необходимым для устойчивого протекания дугового разряда: в глубокой шлаковой ванне, с использованием шлаков, обла-

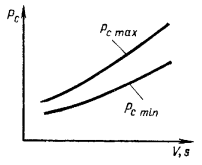


Рис. 121. Зависимость допустимой мощности процесса сварки от объема шлаковой ванны

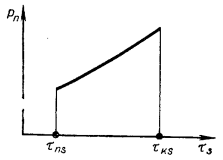


Рис. 122. Зависимость потерь тепла $P_п$ от температуры шлаковой ванны τ_s:

$\tau_{пs}$ — температура плавления шлака; $\tau_{кs}$ — температура кипения шлака

дающих низкими стабилизирующими свойствами, на переменном токе, при низком напряжении холостого хода источника питания.

Условия устойчивости теплового режима можно записать

$$\begin{cases} P_c = P_п; \\ \dfrac{\partial P_c}{\partial \tau_s} < \dfrac{\partial P_п}{\partial \tau_s}, \end{cases}$$

где P_c — мощность, выделяемая в шлаковой ванне при прохождении через нее электрического тока, Вт; $P_п$ — расход тепла на плавление основного и присадочного металла, теплоотвод в основной металл, формирующие устройства и т. д., Вт; τ_s — температура шлаковой ванны, °С.

Равенство выражает равновесие между «приходными» и «расходными» статьями баланса зоны сварки. Если мощность P_c, выделяемая в шлаковой ванне, превысит потери $P_п$, шлаковая ванна перегреется, начнет кипеть, и устойчивость процесса нарушится. Наоборот, в случае превышения потерь $P_п$ над выделяемой мощностью P_c шлаковая ванна необратимо охлаждается, шлак теряет электропроводность, и процесс прекращается.

Графически равенство выражается пересечением кривых $P_c = f(\tau_s)$, $P_п = f(\tau_s)$ (см. рис. 124).

Поскольку потери тепла из шлаковой ванны происходят через ее поверхность, величина $P_п$ зависит от геометрических размеров шлаковой ванны и ее объема. Поэтому с увеличением объема шлаковой ванны увеличивается допустимая мощность процесса электрошлаковой сварки (рис. 121).

Шлак сохраняет высокую электропроводность и обеспечивает устойчивый электрошлаковый процесс в значительном интервале температур: выше температуры плавления и ниже температуры кипения. Поэтому, как следует из рис. 121, существует значительный интервал допустимой мощности процесса при данном

объеме шлаковой ванны. $P_{c\,max}$ соответствует максимальной температуре шлаковой ванны, $P_{c\,min}$ — минимальной.

Неравенство выражает условие теплового равновесия в шлаковой ванне, заключающееся в том, что при повышении температуры шлаковой ванны увеличение потерь $P_п$ должно превышать вызывающее его увеличение мощности P_c, выделяемой в шлаковой ванне. И наоборот.

Характер кривой $P_п = f(\tau_s)$ не зависит от типа источника тока, но зависит от температуры шлака (рис. 122). Кривая $P_c = f(\tau_s)$ имеет различный характер в зависимости от того, какова вольт-амперная характеристика, какой тип электрода — плавящийся или неплавящийся, каково сечение электрода и т. д. Характер кривой $P_c = f(\tau_s)$ определяется прежде всего кривой полезной мощности в функции проводимости нагрузки. Например, для источников тока с пологопадающей и падающей характеристиками кривая полезной мощности $P = f(G_н)$ имеет максимум, соответствующий равенству сопротивлений нагрузки и источника питания (рис. 123).

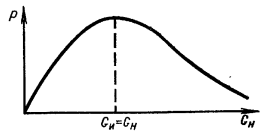


Рис. 123. Зависимость полезной мощности источника тока от проводимости нагрузки

Рабочий диапазон проводимости нагрузки для источника питания с пологопадающей вольт-амперной характеристикой лежит значительно левее максимума мощности, т. е. в той части кривой $P = f(G_н)$, где между P и G наблюдается почти пропорциональная зависимость.

Рабочий диапазон проводимостей нагрузки для источников питания с падающей характеристикой охватывает обычно область максимума и распространяется вправо от него.

За проводимость нагрузки при электрошлаковой сварке принимается проводимость шлаковой ванны. Известна прямая зависимость проводимости шлаковой ванны от ее температуры. Поэтому кривую $P = f(G_н)$ можно преобразовать в кривую $P_c = f(\tau_s)$, откладывая по оси абсцисс значения $G_н = f(\tau_s)$, полученные по данным зависимости проводимости от температуры и рассчитанные в соответствии с геометрическими размерами шлаковой ванны и электрода. График $P_c = f(\tau_s)$ (рис. 124) можно построить в результате такого преобразования.

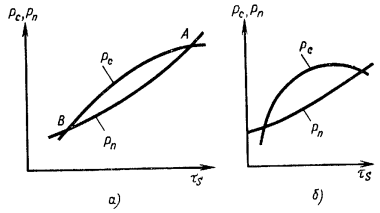


Рис. 124. Зависимость мощности P_c, выделяемой в шлаковой ванне, и потерь тепла $P_п$ от температуры шлаковой ванны τ_s:

а — при использовании источника тока с пологопадающей вольт-амперной характеристикой; *б* — при использовании источника тока с падающей вольт-амперной характеристикой

Условия устойчивого возбуждения электрошлакового процесса. Всякий электрошлаковый процесс протекает в две стадии: наведение шлаковой ванны и собственно электрошлаковый процесс. В большинстве случаев сварки шлаковую ванну наводят с помощью дуги, возбуждаемой между плавящимся электродом и свариваемыми кромками. Основная задача, решаемая в первой стадии, заключается в том, чтобы навести шлаковую ванну как можно скорее и с минимальным расходом плавящегося электрода. Поскольку в период наведения шлаковой ванны металлическая ванна только возникает и развивается и свариваемые кромки еще недостаточно прогреты, на начальном участке шва образуются дефекты: непровары, шлаковые включения,

поры. Поэтому электрошлаковую сварку начинают в специальном технологическом «кармане», который после сварки удаляют.

Так как условия устойчивого горения дуги противоположны условиям устойчивого электрошлакового процесса, первую стадию выполняют на параметрах режима, отличающихся от таковых в период собственно сварки. Сила тока на первой стадии существенно ниже, чем на второй, в то время как напряжение сварки значительно выше. Для легкости возбуждения дуги используют металлические порошки.

При сварке металла относительно малой толщины (> 20 мм) возбуждение дуги и наведение шлаковой ванны особенно затруднительно. Здесь плотность тока настолько мала, что не обеспечивает при жесткой вольт-амперной характеристике источника устойчивого горения дуги. Увеличение скорости подачи электродной проволоки с целью повышения устойчивости дуги невозможно из-за того, что проволока может коснуться формирующего устройства. При этом возбуждается электрическая дуга между проволокой и формирующим устройством и последнее выходит из строя.

Существует способ стабильного наведения шлаковой ванны. который заключается в следующем. На первой стадии процесса электрод подключен к источнику тока через дополнительное сопротивление, которое обеспечивает падающую вольт-амперную характеристику. Скорость подачи электродной проволоки при этом поддерживают не более 160 м/ч, напряжение между токоподводящим мундштуком и образующейся шлаковой ванной составляет 42—46 В и превышает номинальное напряжение дуги.

Большое напряжение способствует быстрому расплавлению флюса, а малая скорость подачи электродной проволоки — сокращению длины начального дефектного участка шва.

После наведения шлаковой ванны скорость подачи электрода увеличивают, а дополнительное сопротивление шунтируют силовым контактором.

Для случая электрошлаковой сварки электродами большого сечения применяют способ сварки, заключающийся в том, что шлаковую ванну наводят заранее с помощью неплавящегося электрода, используя для этого вспомогательный тигель, и заливают затем в пространство между свариваемыми кромками.

Разновидности электрошлаковой сварки и техника ее выполнения. Способы получения соединения электрошлаковой сваркой: сварка; наплавка; наплавка пайкой; сварка с использованием дополнительных источников нагрева (электродной проволоки Джоулевым теплом, электродной проволоки индуктором, шлаковой ванны теплом, выделяемым в результате реакции изотермических присадочных материалов, свариваемых кромок и шлаковой ванны газокислородным пламенем); контактно-шлаковая сварка.

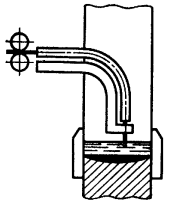


Рис. 125. Схема сварки одной электродной проволокой без колебаний

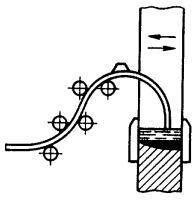


Рис. 126. Схема сварки проволочным электродом без введения мундштука в зазор

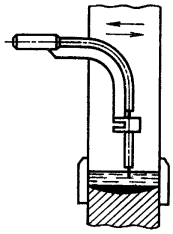


Рис. 127. Схема сварки с увеличенным вылетом электрода

Наибольшее применение в промышленности нашли электрошлаковая сварка и наплавка.

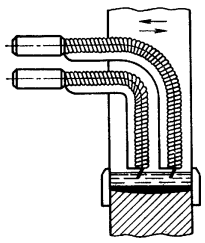


Рис. 128. Схема сварки под плавящимся мундштуком

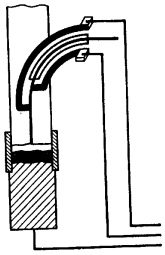


Рис. 129. Схема сварки с подогревом вылета электрода током от независимого источника

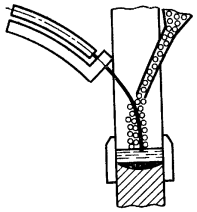


Рис. 130. Схема сварки с присадкой дополнительного материала в виде металлической «крошки»

Существуют три основные разновидности способа электрошлаковой сварки и наплавки: проволочными электродами; плавящимся мундштуком; электродами большого сечения.

Сварка проволочными электродами, широко применяющаяся в промышленности, включает следующие приемы: а) сварку одной электродной проволокой без колебаний (рис. 125); б) сварку одной, двумя или тремя электродными проволоками с колебаниями; в) сварку проволочными электродами без введения мундштука в зазор (рис. 126); г) сварку с увеличенным вылетом электрода (рис. 127); д) сварку под плавящимся мундштуком (рис. 128); е) сварку с подогревом вылета электрода током от независимого источника (рис. 129); ж) сварку с присадкой дополнительного материала в виде обесточенной проволоки, в виде обесточенной пластины, помещаемой между электродами и кромками, в виде некомпактного материала — металлической «крошки» (рис. 130), порошка или гранул.

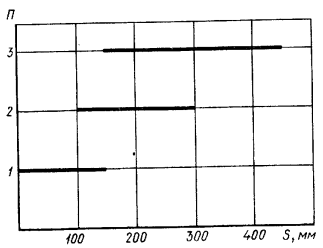


Рис. 131. Возможные соотношения между толщиной свариваемого металла и количеством электродов

Приемы а и б получили в настоящее время наибольшее распространение в промышленности; они позволяют сваривать металл толщиной 20—500 мм. Как правило, эти приемы предусматривают применение проволоки диаметром 3 мм. С целью повышения производительности и упрощения техники сварки возможно применение при сварке металла толщиной до 120 мм приемов г и д. В этом случае обычно используют проволоку диаметром 5 мм.

Прием д чаще всего применяют при выполнении протяженных швов, когда время сварки превышает 12—15 ч.

Приемы г, е и ж имеют целью увеличить производительность сварки при одновременном уменьшении перегрева металла околошовной зоны.

Число электродных проволок выбирают в зависимости от толщины свариваемого металла. От правильности решения этой задачи зависит качество сварного соединения, производительность сварки и выбор типа сварочного аппарата. Металл толщиной до 50 мм обычно сваривают одним неподвижным электродом. При сварке металла толщиной более 50 мм электроды совершают в сварочном

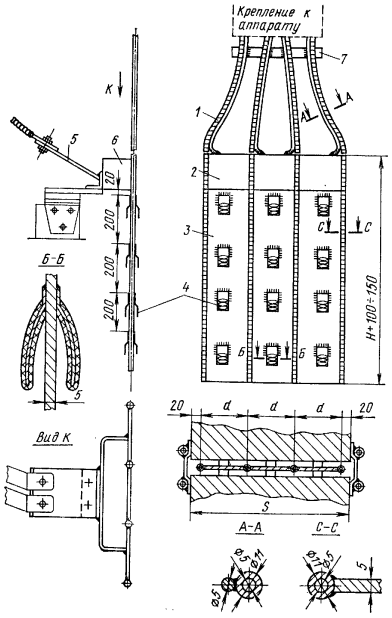


Рис. 132. Общий вид плавящегося мундштука

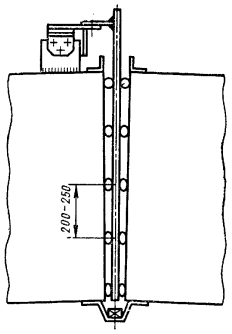


Рис. 133. Схема расположения плавящегося мундштука в зазоре

зазоре колебательные движения. На рис. 131 приведены возможные соотношения между толщиной свариваемого металла и числом электродов.

Сварка плавящимся мундштуком (рис. 132—133) — наиболее универсальный способ. Этим способом можно соединять детали толщиной 20—2500 мм. Плавящийся мундштук представляет собой набор пластин или стержней, которые снабжены каналами для подачи электродной проволоки. В частном случае плавящийся мундштук представляет собой толстостенную трубку. Его форма определяется конфигурацией свариваемого стыка, а способ изготовления зависит от числа стыков. Материал мундштука, как правило, подобен основному. Его химический состав выбирают в зависимости от требований, предъявляемых к металлу шва. Широкое распространение получил мундштук с каналами для подачи электродной проволоки в виде спиралей, навитых из сварочной проволоки диаметром 3—5 мм.

Плавящийся мундштук должен быть надежно изолирован от свариваемых кромок. В качестве изоляторов используют обычно стеклоткань или таблетки, изготовленные из измельченного сварочного флюса, замешенного на жидком стекле. Диаметр электродной проволоки при сварке плавящимся мундштуком стали и титана принимают обычно 3 мм, при сварке алюминия и сплавов на его основе 5—6 мм.

Сварка электродами большого сечения включает сварку одной, двумя или тремя пластинами сплошного сечения, подключенными к общему или разным источникам сварочного тока (рис. 134); сварку одной, двумя или тремя пластинами, имеющими продольные разрезы (рис. 135); сварку с бифилярной схемой подключения электродов к источнику питания (рис. 136).

Пластинчатые электроды обычно применяют для сварки прямолинейных швов длиной не более 1500 мм металла толщиной 30—1000 мм. Толщина пластинчатых электродов составляет 10—15 мм при сварке стали, меди, титана и 20—25 мм

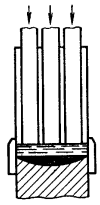


Рис. 134. Схема сварки электродами большого сечения с применением в качестве электрода трех пластин сплошного сечения

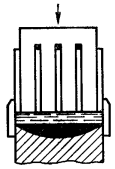


Рис. 135. Схема сварки электрода большого сечения с применением в качестве электрода пластины, имеющей продольные разрезы

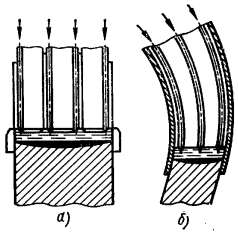


Рис. 136. Сварка с бифилярной схемой подключения электродов к источнику питания

при сварке алюминия и сплавов на его основе. Бифилярная схема подключения позволяет сваривать металл толщиной до 2000 мм. Продольные разрезы в пластинчатых электродах делают для увеличения равномерности провара. Сварку электродами большого сечения применяют большей частью для соединения компактных сечений.

Близка к способу сварки пластинчатым электродом *электрошлаковая сварка ленточным электродом*. В отечественной промышленности этот способ не получил распространения.

В качестве плавящегося электрода может быть использована порошковая проволока и порошковая лента. Порошковая шихта, составляющая наполнение такой проволоки или ленты, может содержать разнообразные компоненты, назначение которых состоит в воздействии на металлургические процессы (раскисление, обессеривание, легирование, модифицирование). Компоненты шихты могут также восполнять расход сварочного флюса на образование гарниссажной корочки, испарение и т. д.

Аналогичной цели служат порошковые компоненты, подаваемые в сварочную ванну через комбинированный электрод; полости, выполненные в стыкуемых кромках; в виде покрытия (пасты), наносимого на поверхность свариваемых кромок. В последних двух случаях покрытие служит также для электроизоляции электродов от кромок.

Помимо плавящихся электродов возможно использование при электрошлаковой сварке неплавящихся электродов, например, из вольфрама. Последние

применяются в комбинации с плавящимися электродами и выполняют вспомогательные технологические функции: поддержание шлаковой ванны в нагретом состоянии в период, когда плавящиеся электроды не подают в сварочную ванну, для циклического изменения мощности при сварке, в качестве датчика для стабилизации режима сварки и т. д.

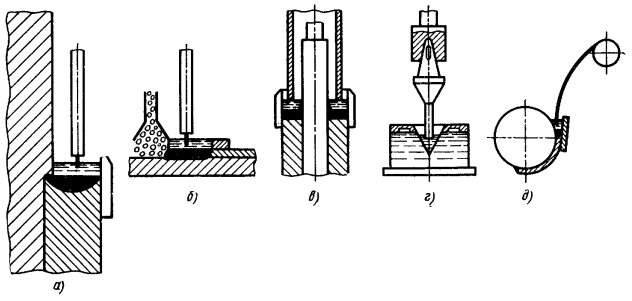


Рис. 137. Схемы электрошлаковой наплавки

Электрошлаковый процесс наплавки (рис. 137): плоских поверхностей в вертикальном положении (рис. 137, *а*); плоских поверхностей в нижнем положении (рис. 137, *б*); цилиндрических поверхностей (рис. 137, *в*, *д*); инструмента (рис. 137, *г*).

Техника электрошлаковой сварки и сварочные электроды, применяемые при электрошлаковой наплавке в вертикальном положении, не отличаются от электрошлаковой сварки.

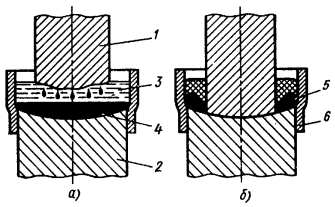


Рис. 138. Схемы контактно-шлаковой сварки:

1—2 — свариваемые детали; *3* — шлаковая ванна; *4* — металлическая ванна; *5* — грат; *6* — форма

Контактно-шлаковая сварка (рис. 138) отличается простотой технологии. Сущность ее заключается в том, что свариваемые поверхности занимают горизонтальное положение; шлаковая ванна находится между нижней и верхней деталями. При пропускании тока через шлак свариваемые поверхности оплавляются, а на нижней поверхности образуется ванна расплавленного металла (рис. 138, *а*). После этого свариваемые части сближаются; шлак вытесняется из пространства между ними, расплавленный металл затвердевает, и детали оказываются сваренными между собой (рис. 138, *б*).

Типы сварных соединений и виды швов. Электрошлаковая сварка позволяет выполнять все существующие типы сварных соединений и виды швов.

Наиболее распространенными и простыми с точки зрения техники сварки являются стыковые соединения (рис. 139 и 140). Исходя из возможностей сварочной аппаратуры, к этому типу швов можно свести большинство свариваемых соединений. Стыковое соединение имеет зазор *в* (табл. 45) между двумя прямыми

кромками (рис. 139, *а—г* и *з*). В некоторых случаях допускается фасонная разделка кромок (рис. 139, *д—ж*).

Для надежной компенсации деформаций соединяемых частей и сохранения в процессе сварки заданной величины сварочного зазора сборка деталей осуществляется, как правило, с клиновидным зазором, расширяющимся кверху.

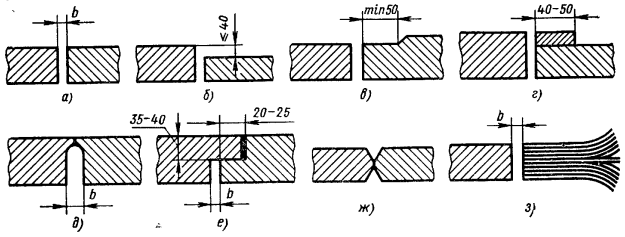


Рис. 139. Типы сварных стыковых соединений

В зависимости от марки стали, способа электрошлаковой сварки, ее режима и условий закрепления угол раскрытия зазора α при сборке может составлять 1—2° (0,02—0,03 рад). Если необходимо получить высокую точность геометрических размеров готового сварного изделия, то сборочный зазор и условия сварки определяют по специальной методике.

Угловые и тавровые соединения (рис. 141, *а—в*) встречаются реже, чем стыковые, из-за сложности их выполнения; V-образную (рис. 141, *г*) и К-образную (рис. 141, *д*) разделки выбирают в случае использования трубчатого плавящегося мундштука. Трубчатый плавящийся мундштук позволяет выполнять также крестообразные соединения (рис. 141, *ж*, *з*). Если возможно, угловые и тавровые соединения заменяют стыковыми (рис. 141, *е*).

Выполняемые электрошлаковой сваркой прямолинейные швы (рис. 142, *а*, *б*) встречаются на практике в сочетании с соединениями всех типов. Как правило, прямолинейные швы сваривают в вертикальном положении. Возможно

45. **Сборочный зазор между параллельными кромками в зависимости от толщины свариваемого металла и расчетного зазора**

Толщина свариваемого металла, мм	16—30	30—80	80—500
Расчетный зазор, мм	18	22	26
Сборочный зазор, мм	19—20	24—25	28—32
Толщина свариваемого металла, мм	500—1000		1000—2000
Расчетный зазор, мм	30		30
Сборочный зазор, мм	36—40		40—42

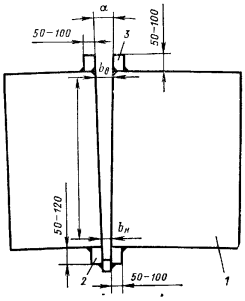


Рис. 140. Общий вид стыка, подготовленного к электрошлаковой сварке:

1 — свариваемое изделие; *2* — начальная технологическая планка; *3* — конечные технологические планки

наклонное положение, допускающее отклонение продольной оси шва от вертикали не более чем на 15—20° (рис. 142, *б*).

Дальнейшее увеличение угла приводит к увеличению площади поверхности шлаковой ванны и уменьшению глубины ванны, вследствие чего устойчивый

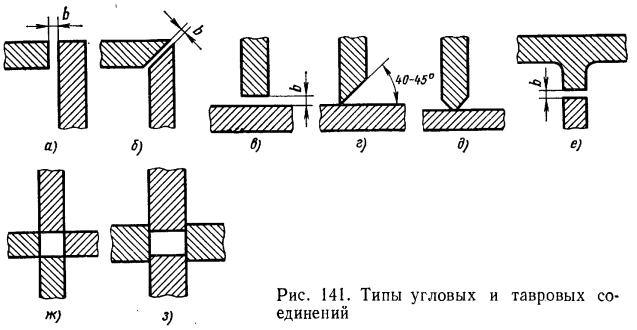


Рис. 141. Типы угловых и тавровых соединений

шлаковый процесс становится невозможным. Разработано формирующее устройство для электрошлаковой сварки в наклонном положении, позволяющее увеличивать угол наклона оси шва и вести сварку в переменном наклонном положении, сохраняя объем и глубину шлаковой ванны постоянными.

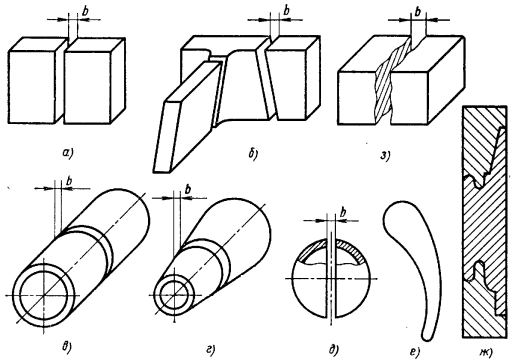


Рис. 142. Виды швов, выполняемых электрошлаковой сваркой

В нижнем положении удается в настоящее время выполнять только электрошлаковую наплавку (рис. 137, *б*).

Кольцевые швы выполняют на цилиндрических (рис. 142, *в*), конических (рис. 142, *г*) и сферических (рис. 142, *д*) деталях. Обычно кольцевые швы встречаются со стыковыми соединениями.

При сварке швов сложного профиля в некоторых случаях, исходя из возможностей технологии сварки, существующее сечение дополняют до прямоугольного специальными планками (рис. 142, *ж*).

Применение плавящегося мундштука позволяет сваривать швы сложной пространственной формы, например кольцевые швы неповоротных соединений (рис. 142, *в*). Длина швов от 100—150 мм до 20 м и более.

Подготовка деталей к сварке. С точки зрения технологии сварки наиболее важными факторами в подготовке деталей к сварке являются форма и шероховатость торцовых поверхностей свариваемых кромок, состояние боковых поверхностей кромок, по которым будут перемещаться или на которые будут установлены формирующие устройства, взаимное расположение примыкающих участков после сварки.

Способ обработки торцовой поверхности кромок зависит от толщины свариваемого металла, его химического состава, точности геометрических размеров, требуемой от сварного изделия, и ответственности конструкции.

При сварке металла толщиной до 200 мм торцовую поверхность кромок обрабатывают обычно газорезательными автоматами, при этом величина отдельных гребешков и выхватов не должна превышать 2—3 мм, а максимальное отклонение

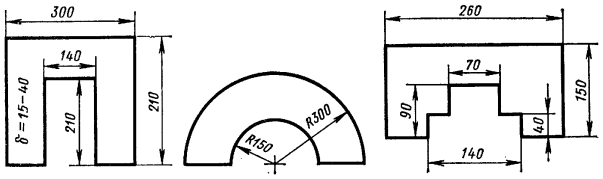


Рис. 143. Типы сборочных скоб

от прямоугольности реза 4 мм. При толщине металла > 200 мм применяют механическую обработку кромок; в случае необходимости можно применять и машинную огневую резку.

Подготовку кромок деталей из легированной стали осуществляют в большинстве случаев механическим способом. В литых и кованых заготовках поверхности, по которым будут перемещаться ползуны, подвергают механической обработке до 3—4-го классов шероховатости поверхности на ширину 60—80 мм от торца кромки. Если заготовки выполнены из проката, поверхность под ползуны может быть очищена от окалины и заусенцев переносным наждачным кругом. Кромки кольцевых швов обрабатывают, как правило, механическим способом.

Для фиксации соединяемых частей при сборке применяют обычно скобы (рис. 143) или прямоугольные планки, привариваемые поперек стыка к соединяемым деталям на расстоянии 500—800 мм одна от другой вдоль стыка. В нижней части стыка прикрепляют входной «карман» (начальную технологическую планку), а в верхней — конечные технологические планки для вывода усадочной раковины. После окончания сварки начальную и конечную технологическую планки удаляют.

При сборке прямолинейных стыков превышение наружной плоскости одной свариваемой кромки над другой (смещение кромок) не должно превышать 1—3 мм, а изменение смещения и волнистости не должны выходить за пределы 1 мм на длине 200—250 мм. Заметим, однако, что современная технологическая оснастка и сварочная аппаратура позволяют выполнять при необходимости некоторые типы стыковых соединений со смещением кромок до 10 мм и изменением смещения в пределах ±10 мм на протяжении 0,5—0,7 м стыка. При применении специальной оснастки допускается смещение кромок до 25—30 мм.

Выполнение кольцевых швов значительно сложнее, чем прямолинейных, поэтому допуски на смещение кромок для них меньше. Максимальная разность диаметров соединяемых частей не должна превышать ±0,5 мм, а максимальное смещение кромок при сборке 0,5—1,0 мм. При сварке кольцевых швов цилиндрических изделий большого диаметра с малой толщиной стенки (до 100 мм), свальцованных из проката без механической обработки кромок, смещение соединяемых частей не должно превышать 3 мм.

Рекомендуемый зазор между соединяемыми кромками кольцевого стыка (рис. 144) приведен в табл. 46.

В месте начала сварки устанавливают начальные технологические планки («карман»), привариваяя их к торцовой поверхности одной из свариваемых частей.

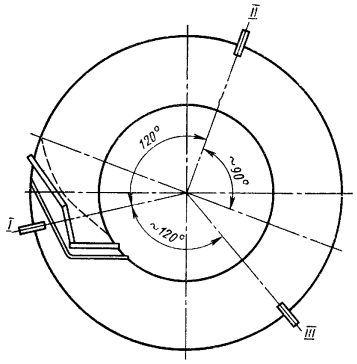


Рис. 144. Схема кольцевого стыка

46. Рекомендуемый зазор между соединяемыми кромками кольцевого стыка

Толщина металла, мм	Зазор между кромками в местах установки дистанционных прокладок, мм		
	I	*II*	*III*
20—50	25	29	27
50—100	28	32	30
100—150	30	34	32
150—200	32	35	34
200—250	33	37	35
250—300	34	38	36
300—450	36	41	38

Затем укрепляют дистанционные прокладки *I*, *II*, *III*, фиксирующие требуемую величину зазора (см. табл. 46). Собранные части фиксируются с помощью шести или восьми планок, привариваемых равномерно по всей окружности кольцевого стыка.

Способы формирования поверхности шва: свободное; с помощью остающихся накладок и вкладышей; с помощью передвигаемых или переставляемых формирующих устройств, охлаждаемых или неохлаждаемых.

Идеальным может быть признан способ свободного формирования поверхности шва. Однако вследствие жидкотекучести металлической и шлаковой ванн и большого их объема этот способ может быть осуществлен только при электрошлаковой наплавке в нижнем положении.

Наибольшее распространение получили формирующие устройства, охлаждаемые водой (ползунов, накладок и др.).

Типы защиты металлической ванны: шлаковой ванной (окислительной по отношению к компонентам металла шва, нейтральной, раскислительной); шлаковой ванной с дополнительной защитой струей газа (инертного, активного — CO_2, N_2 и др.).

Наибольшее распространение получила электрошлаковая сварка без дополнительной защиты струей газа. Окислительные шлаки (АН-8, АНФ-7, АНФ-8, АНФ-23, АН-348А, ФЦ-7 и др.) используют при электрошлаковой сварке стали и меди. Нейтральные шлаки (АНФ-1П, АН-301, АН-Т2 и др.) применяют при

сварке высоколегированной стали, алюминия, титана и других химически активных металлов.

Раскислительные шлаки применяют при электрошлаковой наплавке пайкой нержавеющей стали, меди и ее сплавов на сталь.

Дополнительную защиту шлаковой ванны инертными газами используют при электрошлаковой сварке активных металлов, например титана и высоколегированной стали.

Известна также дополнительная защита разогретых частей свариваемого металла газом, подаваемым через штуцеры ползуна.

Техника электрошлаковой сварки. Электрошлаковая сварка — специфический технологический процесс, где обеспечение устойчивой работы аппарата и технологической оснастки и получение сварного соединения гарантированного качества зависит не только от правильного выбора технологических параметров режима (скорости подачи электрода, напряжения сварки и т. д.), но и от точного выполнения оператором-сварщиком всей совокупности операций по обеспечению процесса (правильной установки аппарата, укрепления ползунов и корректировки их положения в процессе сварки, соблюдения оптимального положения токоподводящего мундштука в зазоре, предотвращения протекания шлака через случайные зазоры между поверхностью детали и ползуном и т. д.), что в совокупности получило название техники электрошлаковой сварки.

Техника электрошлаковой сварки прямолинейных швов. Собранное изделие устанавливают на сварочном стенде в зоне действия сварочного аппарата либо аппарат крепят на изделии. Устанавливают требуемый вылет электрода, проверяют параллельность формирующих ползунов свариваемым кромкам. Выставляют в зазоре электроды и, если необходимо, добиваются нужного размаха их колебаний (возвратно-поступательного перемещения вдоль зазора). После этого опускают аппарат вниз по стыку, к началу шва, чтобы мундштуки находились от дна «кармана» на расстоянии 110—120 мм, и плотно прижимают ползуны к стыку. Усилие прижатия должно быть 50—80 кг. По контуру прилегания ползунов делают уплотнение зазоров глиной. На дно начальной планки насыпают металлический порошок или стружку слоем толщиной около 10 мм, затем слой сварочного флюса толщиной 3—5 мм. В нижней части изделия привариваают пластину 150 × 100 × 10 для крепления кабеля заземления.

Включают подачу охлаждающей воды в ползуны. На пульте управления аппарата и на источнике питания устанавливают заданные параметры сварки. Проверив наличие необходимого количества электродной проволоки, флюса, а также инструмента, нажимают кнопку «пуск». После возбуждения дуги досыпают флюс до заданного количества. Если необходимо, изменяют скорость подачи электродной проволоки. По мере увеличения глубины шлаковой ванны сообщают электродам возвратно-поступательное перемещение в зазоре. При необходимости корректируют напряжение сварки.

Время наведения шлаковой ванны и перехода к электрошлаковому процессу составляет 3—5 мин. Нормальный электрошлаковый процесс должен установиться в пределах начальной технологической планки.

При подходе зеркала шлаковой ванны к верхнему срезу ползунов включают механизм вертикального перемещения сварочного аппарата. При ручном управлении аппарата механизм ее вертикального перемещения включают периодически, чтобы высота подъема за одно включение составляла 2—3 мм. Средняя скорость v_c и напряжение U_c сварки зависят от толщины свариваемых деталей. Первая с увеличением толщины деталей уменьшается, вторая — увеличивается (рис. 145).

В процессе сварки необходимо наблюдать за расположением электродов в зазоре и при необходимости производить их корректировку, а также периодически обстукивать ползуны.

После выполнения шва нажимают кнопку «стоп», а затем кнопку «вверх» для вывода электродов из шлаковой ванны. Снимают ползуны и отключают подачу охлаждающей воды.

Техника сварки кольцевых швов (рис. 146) сложнее, чем стыковых, вследствие необходимости совмещения конца (рис. 147, *а*) шва с его началом (рис. 147, *б*). Электрошлаковая сварка кольцевого шва имеет три этапа: начало (заполнение «кармана»); выполнение погонной части; замыкание кольцевого шва. Каждому этапу соответствует свой режим. Следует заметить, что скорость сварки кольцевого шва выбирают на 10—15% ниже той, которая рекомендуется для соответствующей толщины при сварке прямолинейных швов.

На первом этапе заваривают «карман» или его большую часть: начало — без вращения изделия, но с подъемом аппарата, конец кармана — при вращении изделия и неподвижном аппарате. Последовательность операций при наведении шлаковой ванны такая же, как и при сварке прямолинейных швов. При достижении шлаковой ванной глубины 20—30 мм включают подачу второго электрода и доводят глубину шлаковой ванны до 40—50 мм, постепенно увеличивая скорость подачи электродов. При уменьшении вылета электродов до 70 мм включают подъем аппарата. По мере увеличения длины зазора между кромками в результате заполнения «кармана» включают механизм колебания электродов, постепенно увеличивая размах колебаний. При этом необходимо тщательно контролировать величину Δ_1 (рис. 115). Она должна составлять 15—18 мм. Одновременно увеличивают расстояние между электродами d, раздвигая мундштуки. Особое внимание следует уделить контролю за глубиной шлаковой ванны, поскольку длина зазора в «кармане» все время увеличивается. Измеряют глубину шлаковой ванны, как и при сварке прямолинейных швов, с помощью металлического щупа, изготовленного, например, из электродной проволоки диаметром 4—8 мм. Щуп погружают в шлаковую ванну у ползуна до упора в кристаллизующийся металл и быстро вынимают. Перед подходом шлаковой ванны к верхней части кармана устанавливают передний ползун и прижимают его к кромкам таким образом, чтобы верхний срез его возвышался над верхней частью кармана. Подъем аппарата должен быть прекращен, когда верхний срез ползуна поднимается на 50—60 мм над горизонтальным диаметром кольцевого шва. Тогда же включают механизм вращения изделия. К этому времени режим сварки соответствует второму этапу — выполнению погонной части.

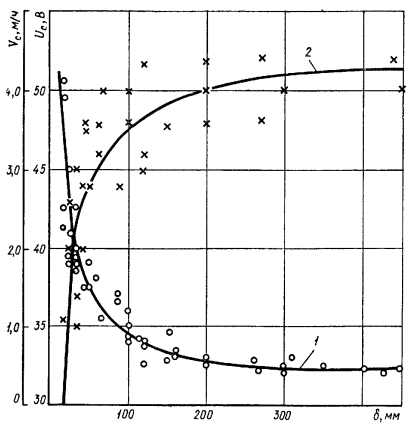


Рис. 145. Зависимость скорости электрошлаковой сварки и напряжения сварки от толщины свариваемых деталей при выполнении прямолинейных швов

На втором этапе сварки (см. рис. 146, *б*) периодически контролируют положение электродов в разделке, параметры режима сварки, глубину шлаковой ванны, плотность прилегания ползунов к карманам, величину Δ_1. После того как заварена $^1/_3$ длины шва, начальный участок шва вырезают газовой резкой, контролируя форму выреза с помощью шаблона. Вырез тщательно зачищают механическим способом, не оставляя дефектов и окалины.

Третий этап является наиболее трудоемким и ответственным. Сложность сварки на замыкающем участке обусловлена не только необходимостью выполнения специальных приемов, но и применением особых предосторожностей для предотвращения трещин, опасность возникновения которых резко возрастает в связи с увеличивающейся жесткостью свариваемого соединения. На третьем этапе скорость подачи электродов и напряжение сварки постепенно уменьшают,

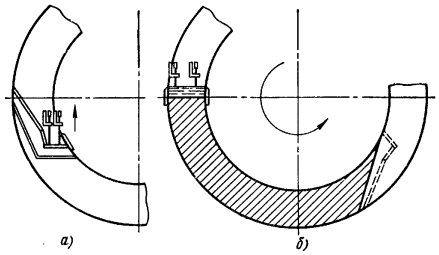


Рис. 146. Схема сварки кольцевого шва

а начальный участок предварительно подогревают газопламенными горелками. Как только прямолинейный участок выреза займет вертикальное положение, прекращают вращение изделия и включают подъем аппарата. В это время убирают тягу, на которой крепится внутренний (задний) ползун. Перед этим, как только сократится расстояние между зеркалом шлаковой ванны и вырезом до 20—25 мм, внутренний ползун направляют на начало и поднимают на 50—60 мм, не допуская вытекания шлака (рис. 147, *а*).

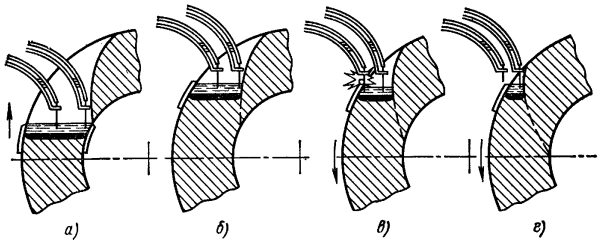


Рис. 147. Схема сварки замыкающей части кольцевого шва

На протяжении всего этапа необходимо внимательно следить, чтобы верхний мундштук, с одной стороны, не касался выреза, иначе он обгорит; с другой стороны, чтобы он подходил к вырезу достаточно близко (10—12 мм), что необходимо для нормального провара. Это достигается манипуляцией концевыми выключателями и сближением мундштуков (рис. 147, *б*). После заварки вертикальной части аппарат останавливают и включают вращение изделия (рис. 147, *в*). Скорость сварки снижают до 0,3—0,35 м/ч, а напряжение сварки снижают на 3—5 В. Как только амплитуда колебаний уменьшится до 30 мм, нижний электрод отклю-

чают, и сварку заканчивают одним электродом (рис. 147, *г*). Сварку кольцевых швов можно осуществлять с применением одного, двух и трех электродов.

Число слоев шва: однопроходная сварка; многопроходная сварка. Наибольшее распространение получил способ однопроходной сварки. Он самый производительный по количеству наплавленного металла, однако характерен высокой погонной энергией сварки, вызывающей снижение механических свойств сварного соединения.

При многопроходной сварке указанный недостаток проявляется в меньшей степени. Этот способ имеет несколько вариантов. Один из них заключается в том, что сварку выполняют сначала с одной, а затем с другой стороны стыка; перед сваркой в зазор между свариваемыми кромками устанавливают вкладыши, которые при сварке сплавляют с обеих сторон с металлом шва.

Другой вариант состоит в многопроходной сварке стыка с одной стороны, при этом используют специальный ползун, который помещается в зазоре между свариваемыми кромками.

Возможно использование автоматической сварки под флюсом для выполнения облицовочного шва.

Сварка многослойного шва в отличие от однослойного позволяет дробить один мощный источник тепла на несколько менее мощных и тем самым уменьшить погонную энергию сварки. Кроме того, выполнение каждого последующего слоя шва вызывает повторный нагрев предыдущего, что способствует его термообработке и повышению механических свойств сварного соединения.

Род тока: постоянный; переменный (однофазный, трехфазный); модулированный (с периодическим отклонением тока — с дозированной подачей мощности, с периодическим уменьшением силы тока или напряжения).

Электрошлаковую сварку ведут преимущественно на переменном токе. Постоянный ток используют при сварке металла малой толщины (40 мм и менее). Установлено, что при сварке на постоянном токе происходит электролиз шлака.

Однофазный переменный ток применяют при сварке одним электродом. С целью равномерной загрузки сети при числе электродов два и более используют трехфазный ток. Каждый электрод подключают, как правило, к отдельному источнику тока. Возможно групповое подключение электродов — по нескольку на каждый источник.

Сущность способа сварки с дозированной подачей мощности заключается в том, что сварочный ток периодически отключают с заданной частотой, сохраняя скорость подачи электродной проволоки постоянной. Преимущество этого способа заключается в уменьшении погонной энергии сварки и одновременно повышении допустимой скорости сварки.

Разработаны различные варианты модуляции сварочного тока, заключающиеся в периодическом изменении вылета электрода, изменении скорости подачи электродной проволоки, сопровождающемся одновременно и изменением напряжения сварки. Такие способы модулирования тока и напряжения существенно расширяют технологические возможности электрошлаковой сварки и позволяют повысить качество сварного соединения.

Особенности структуры и свойства сварного соединения. Особенности термического цикла. При электрошлаковой сварке однослойного шва имеет место простой термический цикл (рис. 148, *а*); при сварке многослойного шва — сложный термический цикл (рис. 148, *б*).

В табл. 47 приведены данные о мгновенных скоростях охлаждения при 500° С и длительностях выдержки металла (в рассматриваемом участке околошовной зоны T_{max} = 1300° С) при температурах выше 1000° С для указанных способов сварки.

Особенности структуры и механических свойств металла шва и околошовной зоны сварного соединения. Процесс первичной и вторичной кристаллизации металла шва при электрошлаковой сварке не имеет принципиальных отличий от кристаллизации при электродуговой сварке под флюсом. В примыкающих к ползунам участках металлической ванны кристаллиты растут перпендикулярно к их поверхности, прорастая на 10—20 мм в глубь шва. Первичная кристаллизация носит прерывистый характер, швы имеют слоистое строение. При электрошлаковой сварке толщина кристаллизационных слоев в несколько раз больше, чем при дуговой. Металл шва имеет столбчатое строение. Столбчатые кристаллы отличаются сравнительно крупными размерами, достигая в поперечнике 3—7 мм, и легко различимы при изучении макроструктуры.

47. Мгновенные скорости охлаждения

Способ сварки	Мгновенная скорость охлаждения при 500 °С, °С/с	Длительность выдержки при температурах > 1000 °С, с
Электрошлаковая	0,4	175
Дуговая под флюсом	4,3	14,5
Электронно-лучевая	40	1,5

При электрошлаковой сварке в зависимости от ее режима, химического состава и толщины свариваемого металла наблюдаются макроструктуры металла шва четырех типов. Макроструктура первого типа характерна наличием трех участков. У границы сплавления и у ползунов располагается участок толстых столбчатых кристаллитов. Каждый такой кристалл является колонией дендритов, имеющих стволы и слабовыраженные оси первого порядка. На некотором расстоянии от границы сплавления толстые столбчатые кристаллиты переходят в более тонкие кристаллиты, представляющие собой колонии развитых, имеющих

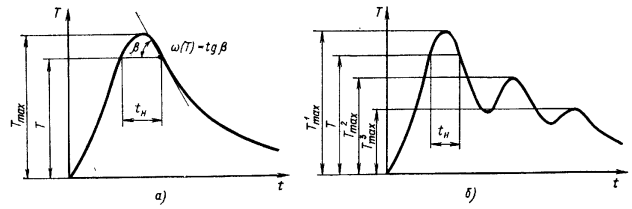


Рис. 148. Схемы термических циклов

оси второго и третьего порядка дендритов. Прорастая в глубь шва, они доходят до участка равноосных кристаллитов, занимающего полосу шириной 0,5—10 мм по оси шва. Равноосные кристаллиты имеют дендритное, значительно разветвленное строение. Макроструктура второго типа наиболее распространена. Она характеризуется наличием только участка толстых и тонких столбчатых кристаллитов. В макроструктуре третьего типа имеется только участок тонких столбчатых кристаллитов, прорастающих от границы сплавления до оси шва (аналогично строению швов при дуговой сварке). Макроструктура четвертого типа отличается наличием только толстых столбчатых кристаллитов. Во всех случаях металл участка толстых кристаллитов обладает более высокой однородностью и плотностью, чем металл других участков.

С целью повышения пластичности металла шва целесообразно измельчение первичной столбчатой структуры. Это возможно путем применения специальных элементов — модификаторов (титан, цирконий и др.); возбуждения в сварочной ванне ультразвуковых или механических инфразвуковых колебаний; электро-

магнитного перемешивания; искусственного уменьшения погонной энергии сварки или увеличения интенсивности искусственного охлаждения металла шва со стороны формирующих устройств.

Вторичная кристаллизация происходит у металлов, претерпевающих при охлаждении аллотропические превращения (например, сплавы железа с углеродом). Характер вторичной микроструктуры зависит от химического состава металла шва, термического цикла и других причин.

Поскольку при электрошлаковой сварке скорость остывания металла шва и околошовной зоны существенно меньше, чем при других способах сварки плавлением (см. табл. 47), здесь распад первичного зерна происходит наиболее полно, и вторичная структура более равновесна. Вместе с тем большая длительность пребывания металла околошовной зоны при высокой температуре вызывает явление перегрева, которое характеризуется крупными зернами вторичной структуры с пластинчатым ферритом (видманштеттова структура). На участке перегрева околошовной зоны наблюдается ухудшение механических свойств (пластичности, стойкости против перехода в хрупкое состояние) по сравнению с исходными свойствами основного металла.

Ответственные сварные конструкции, выполненные электрошлаковой сваркой, подлежат последующей термообработке — как правило, нормализации с высоким отпуском. Целью нормализации является измельчение вторичного зерна, устранение явления перегрева. Цель высокого отпуска — уменьшение остаточных напряжений в сварном соединении.

Как уже отмечалось ранее, благодаря специфическим особенностям электрошлаковой сварки металл шва отличается повышенной стойкостью против образования пор и других неплотностей, меньшей чувствительностью к влажности шлака, ржавчине и загрязнениям кромок, а также имеет низкую склонность к образованию кристаллизационных трещин, поэтому сварное соединение практически равнопрочно основному металлу.

Для повышения пластических свойств сварного соединения (особенно ударной вязкости) применяют высокотемпературную обработку (табл. 48).

В последнее время разрабатываются приемы, позволяющие уменьшить перегрев околошовной зоны при электрошлаковой сварке или устранить его методами, более простыми и дешевыми, чем последующая термообработка в печи. К первым относятся способы сварки модулированным током и с интенсивным охлаждением поверхности сварного шва.

48. Результаты испытаний образцов после термической обработки

Материал	Виды термической обработки	Результаты испытаний образцов				
		$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ	ψ	$a_н$, кгс·м/см²
		кгс/мм²		%		
Основной металл (35 л)	Без термической обработки	49,05	27,6	15,6	28,4	4,75
	Отпуск	49,7	26,5	20,5	22,8	6,27
	Нормализация	54,6	31,8	11,3	21,4	7,30
	Нормализация с отпуском	52,5	26,1	24,4	30,5	5,30
Зона термического влияния	Без термической обработки	55,8	33,2	12,8	23,1	5,10
	Отпуск	46,9	24,8	20,9	41,5	5,15
	Нормализация	49,4	26,4	17,3	20,7	7,29
	Нормализация с отпуском	55,4	26,8	22,8	34,5	5,79
Металл шва	Без термической обработки	56,3	32,9	11,1	17,2	1,51
	Отпуск	53,7	29,8	24,7	40,5	2,95
	Нормализация	55,9	32,1	20,5	25,9	5,10
	Нормализация с отпуском	53,1	27,5	15,8	34,1	8,32

К числу вторых можно отнести способ электрошлаковой сварки с сопутствующей нормализацией сварного соединения, осуществляемой с помощью источника нагрева, перемещаемого вдоль шва вслед за сварочной головкой.

Одной из важных мер улучшения механических свойств околошовной зоны является разработка свариваемых материалов, нечувствительных к термическому циклу электрошлаковой сварки.

Преимущества и недостатки. Перспективы развития электрошлаковой сварки. Преимущества электрошлаковой сварки: металл практически любой толщины сваривается за один проход;

не требуется (как правило) разделка кромок под сварку (сварочный зазор образуется прямыми кромками);

сварка вертикальных швов требует значительно меньше производственных площадей;

расход флюса составляет 0,2—0,3 кг на погонный метр шва, независимо от толщины свариваемого металла;

благодаря малому количеству расплавляемого флюса на погонный метр шва электрическая энергия расходуется более рационально; этому же способствует применение сварочных трансформаторов с жесткой внешней характеристикой;

вертикальное расположение оси шва в значительной степени облегчает всплывание газовых пузырей, частиц шлака и удаление их из металла;

симметричность разделки и положения в ней электродов позволяют избежать угловых деформаций.

Недостатки электрошлаковой сварки: необходимость проведения (как правило) последующей высокотемпературной термической обработки для получения требуемых механических свойств сварного соединения, особенно в конструкциях, работающих при отрицательных температурах.

Отсутствие возможности сварки с остановками. Шов следует от начала до конца выполнять без остановок, так как при вынужденных перерывах процесса сварки в шве возникает неисправимый или трудноисправимый дефект.

Устранение указанных недостатков электрошлаковой сварки и наплавки является предметом систематических поисков исследователей не только в СССР, но и за рубежом. Следует отметить, что в этом направлении уже много сделано, особенно по повышению надежности осуществления электрошлакового процесса. Что же касается отказа от высокотемпературной термической обработки сварных изделий, выполненных электрошлаковой сваркой, то многочисленные работы, проведенные в этом направлении, показывают, к сожалению, на отсутствие какого-либо общего решения. По-видимому, различные случаи потребуют различных решений. Одно ясно, что вопросы необходимости применения высокотемпературной обработки, повышения стойкости соединений против трещин и увеличения производительности процесса следует решать комплексно путем рационального выбора свариваемых и сварочных материалов, приемов и режимов сварки.

Это актуальная и крайне необходимая проблема, от успешного решения которой будет во многом зависеть в будущем объем применения электрошлаковой сварки.

Из других задач и проблем, решение которых значительно повысит экономичность и эффективность электрошлаковой сварки, можно назвать дальнейшее повышение производительности процесса в результате разработки новых способов и приемов сварки, совершенствование техники ее выполнения, а также резкое сокращение продолжительности сборочных и вспомогательных операций; разработку наиболее рациональных способов легирования и модифицирования металла шва оптимального состава; создание флюсов, обеспечивающих минимальное окисление легирующих элементов; разработку новых принципов конструирования изделий, наиболее полно учитывающих особенности электрошлаковой сварки; решение задач, связанных с сочетанием электрошлаковой отливки с электрошлаковой сваркой; создание новых сварочных аппаратов, обладающих широкими технологическими возможностями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бельчук Г. А.** Сварные соединения в корпусных конструкциях. Л., «Судостроение», 1969. 279 с.
2. **Ерохин А. А.** Основы сварки плавлением. М., «Машиностроение», 1973, 448 с.
3. **Лесков Г. И.** Электрическая сварочная дуга. М., «Машиностроение», 1970, 336 с.
4. **Мацкевич И. Р. и Деев Г. Ф.** Поверхностные явления в сварочных процессах. М., «Металлургия», 1974. 121 с.
5. **Новожилов Н. М.** Основы металлургии дуговой сварки в активных защитных газах. М., «Машиностроение», 1972. 168 с.
6. **Петров Г. Л.** Сварочные материалы. Л., «Машиностроение», 1972. 280 с.
7. **Потапьевский А. Г.** Сварка в защитных газах плавящимся электродом. М., «Машиностроение», 1974. 240 с.
8. **Теоретические** основы сварки. М., «Высшая школа», 1970, 392 с. Авт. В. В. Фролов, В. А. Винокуров, В. Н. Волченко и др.
9. **Технология** электрической сварки металлов и сплавов плавлением. Под ред. Б. Е. Патона, М., «Машиностроение», 1974. 768 с.
10. **Шоршоров М. Х., Чернышева Т. А., Красовский А. И.** Испытание металла на свариваемость, 1972. 240 с.
11. **Хренов К. К.** Сварка, резка и пайка металлов. М., «Машиностроение», 1974. 408 с.

Глава 7
КОНТАКТНАЯ СВАРКА

Контактная сварка представляет собой процесс образования неразъемных соединений в результате нагрева металла проходящим электрическим током и пластической деформации зоны соединения под действием сжимающего усилия. Контактная сварка объединяет большую группу различных способов соединения. Основные особенности этих способов — надежность соединений, высокий уровень механизации и автоматизации, высокая производительность процесса и культура производства.

Контактная сварка находит широкое распространение в современной промышленности. Считается, что около 30% всех сварных соединений в изделиях различного назначения выполняется контактной сваркой. При этом успешно сваривается большинство конструкционных материалов в широком диапазоне толщин и сечений, например от нескольких микрон до 20—30 мм при точечной сварке [8, 9].

СПОСОБЫ СВАРКИ И ОБЛАСТЬ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Основными способами контактной сварки являются стыковая, точечная и шовная сварка. Они отличаются по конструкции соединений и технологии их получения.

Стыковая сварка — детали соединяются по всей площади касания. В зависимости от состояния металла в зоне соединения различают стыковую сварку сопротивлением и оплавлением.

При этом детали *1* укрепляют в токоподводах *2—3* (рис. 1,*а*), один из которых, например токоподвод *2*, является подвижным и связан с приводом усилия машины. При сварке сопротивлением детали сжимают довольно значительным усилием F и подают напряжение на первичную обмотку сварочного трансформатора *4*, что вызывает появление тока *I* во вторичном контуре. Протекание тока через детали, являющиеся частью этого контура, приводит к постепенному нагреву металла в стыке до температуры, близкой к температуре плавления (0,8÷0,9) $T_{пл}$. Затем увеличивают усилие (осадка деталей). При этом возрастает перемещение S подвижной детали, происходит пластическая деформация металла в стыке и образование соединения в твердом состоянии. Иногда нагрев производится ТВЧ-индуктором, внутри которого располагаются детали.

При сварке сопротивлением не обеспечивается достаточно полное удаление окисных пленок, и трудно добиться равномерного нагрева деталей по всему сечению. Поэтому сварка сопротивлением используется ограниченно, например, для соединения проволочек, стержней и труб сечением до 200—250 мм^2 в основном из низкоуглеродистой стали [5].

При сварке непрерывным оплавлением детали сближают при очень малом усилии (штриховая линия на рис. 1,*а*) при включенном сварочном трансформаторе. Оплавление деталей происходит в результате непрерывного образования и разрушения контактов — перемычек между их торцами. В результате оплавления на торце образуется преимущественно сплошной слой жидкого металла, который при осадке вместе с загрязнениями (окисными пленками) выдавливается из стыка. Соединение при этом образуется в твердом состоянии. Для более равномерного

нагрева деталей применяют предварительный подогрев током, непосредственно подводимым к деталям, или через зазор с помощью индуктора.

Для защиты металла от взаимодействия с газами при стыковой сварке химически активных металлов используют защитные (инертные газы) среды. Помимо соединения деталей, которые расположены соосно, стыковой сваркой выполняют тавровые соединения стержней с листом, а также сваривают «перекрещивающиеся» проволоки или стержни (решетчатые конструкции). Сварка оплавлением находит применение при создании разнообразных конструкций как малых, так и больших сечений (до 100 000 мм²). Таким способом получают длинномерные изделия — трубопроводы, железнодорожные рельсы, заготовки в условиях непрерывной

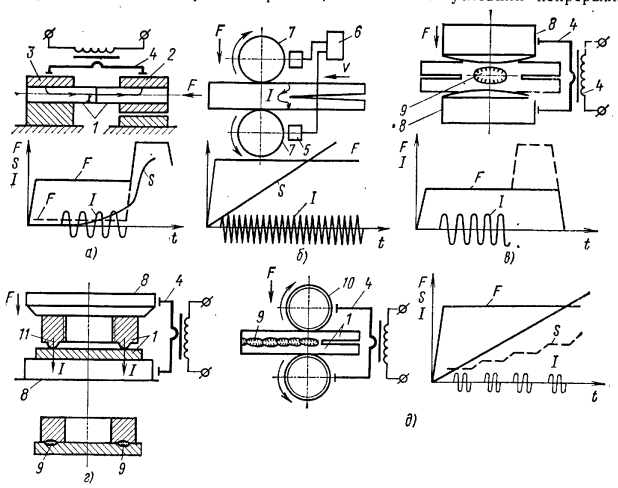


Рис. 1. Основные способы контактной сварки:

F — усилие; *S* — перемещение деталей; *I* — сварочный ток

прокатки, арматуру железобетона и т. п. Этот способ применяют для изготовления деталей замкнутой формы — ободьев автомобильных колес, колец жесткости реактивных двигателей (шпангоутов), звеньев цепей, а также сложных деталей из простых заготовок — элементов шасси летательных аппаратов, тяг, валов, кожухов карданных валов автомобилей и др. В целях экономии легированной стали стыковую сварку используют при изготовлении режущего инструмента. Например, к хвостовой части инструмента из низкоуглеродистой или углеродистой стали приваривают рабочую часть из быстрорежущей стали [5].

В высокопроизводительных автоматических установках для сварки продольных швов тонкостенных труб из различных металлов (стали, латуни и т. п.) применяют радиочастотную сварку токами частотой 70—450 кГц, отличающуюся высокой концентрацией нагрева в зоне соединения (рис. 1,*б*), который производится, например, индуктором *5*, связанным с генератором *6*. Оплавленный металл в стыке выдавливается усилием сжимающих роликов *7*. Этот вид сварки применяют также при ребрении труб, изготовлении профилей различного сечения и т. п. [2, 8].

Точечная сварка — детали соединяются по отдельным участкам касания, называемым точками. При этом детали собирают внахлестку (рис. 1, *в*) и сжимают электродами (токоподводами *8*), связанными со сварочным трансформатором *4*, при включении которого детали нагреваются кратковременным (0,01—0,5 с) импульсом тока до появления расплавленной зоны *9* или ядра точки. Размеры ядра характеризуются его диаметром и высотой (глубиной проплавления). Номинальный диаметр ядра выбирают в зависимости от толщины δ свариваемых деталей. Рекомендуемая глубина проплавления при сварке деталей одинаковой толщины составляет 30—80%. Расплавленный металл удерживается в ядре от выплеска и надежно защищается от взаимодействия с окружающей атмосферой уплотняющим пояском, формирующимся в результате интенсивной пластической деформации металла, примыкающего к ядру.

Усилие после выключения тока сохраняется некоторое время, для того чтобы кристаллизация металла происходила под давлением. Тем самым предотвращается образование дефектов усадочного происхождения — трещин, рыхлот и т. п. С этой же целью при соединении деталей больших толщин (свыше 1,5—2 мм) и из металлов с относительно малой пластичностью (высоколегированные алюминиевые сплавы, жаропрочные сталь и сплавы) сразу после выключения тока резко увеличивают усилие (в 1,5—2 раза) для дополнительной проковки ядра.

По способу подвода тока точечная сварка может быть двусторонней и односторонней. При двусторонней сварке ток подводят к верхней и нижней деталям, а при односторонней — к одной из них. Для повышения плотности тока в зоне соединения при одностороннем токоподводе детали располагают на токоподводящей медной подкладке. Одностороннюю сварку применяют при затрудненном доступе к одной из деталей, а также при необходимости увеличения производительности процесса, так как в этом случае можно одновременно сваривать несколько точек [9].

В ряде случаев используют комбинированные соединения, например клеесварные и сварно-паяные. Клей и припой вводятся под нахлестку преимущественно после выполнения точечной сварки с целью повышения статической и особенно усталостной прочности соединений, а также их коррозионной стойкости [10].

Разновидностью точечной сварки является р е л ь е ф н а я с в а р к а, когда первоначальный контакт деталей происходит по ограниченной рельефами площади. Эти рельефы (выступы), например в сечении в форме полукруга или трапеции, предварительно механически формируются на деталях. В начальный период сварки наличие рельефа *11* (рис. 1, *г*) дает возможность обеспечивать концентрированный нагрев в месте контакта при больших плотностях тока. В дальнейшем рельефы постепенно деформируются и на определенной стадии происходит плавление металла и образование ядра точки. Обычно на поверхности деталей выполняют несколько рельефов или протяженный выступ замкнутой формы в виде кольца. Таким образом, детали соединяются одновременно в нескольких точках или образуется непрерывный герметичный шов (контурная рельефная сварка). Способом точечной сварки возможно соединять элементы жесткости и крепежные детали с листами, тонкостенными оболочками, панелями. Таким образом, сваривают разнообразные по сечению профили с обшивкой крыла или фюзеляжа самолета [4, 9]. Точечная сварка используется также при производстве силовых узлов, например ферм в строительной индустрии, гофрированных и сотовых конструкций. Большой объем занимает точечная и рельефная сварка в радиоэлектронной промышленности при монтаже элементов схем, герметизации корпусов полупроводниковых приборов и т. п. Производительность точечной сварки очень высока и может достигать 200 точек в минуту.

Шовная сварка — образование непрерывного соединения (шва) путем постановки последовательного ряда перекрывающих друг друга точек. Таким образом достигается герметичность сварного соединения. При шовной сварке подвод тока, передачу усилия к деталям и их перемещение осуществляют через вращающиеся дисковые электроды — ролики *10* (рис. 1, *д*). Как и при точечной сварке, детали обычно собираются внахлестку и нагреваются током без применения специальных

средств защиты жидкого металла от взаимодействия с атмосферой. По положению роликов в момент прохождения тока различают непрерывную и шаговую (прерывистую шовную сварку. В первом случае ток проходит при вращающихся роликах, во втором — при неподвижных (штриховая линия на рис. 1, *д*). Шаговая сварка, несмотря на меньшую производительность, имеет ряд преимуществ, заключающихся в более высокой стойкости роликов и меньшей склонности к образованию дефектов усадочного происхождения.

Существуют некоторые разновидности шовной сварки (односторонняя, многошовная сварка, шовная сварка встык и т. д.), отличающиеся схемой подвода тока, числом одновременно выполняемых швов и способом сварки деталей. При сварке встык между роликами и деталями помещают фольгу, и расплавление металла происходит на всю толщину [8].

Шовная сварка отличается высокой скоростью выполнения соединений — до 5 м/мин и более, широко используется в промышленности при создании различных емкостей, резервуаров, топливных баков автомобиля. Этот способ соединения находит применение и в приборостроительной промышленности, при производстве чувствительных элементов в виде сильфонов или мембран [4, 9].

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ

Необходимым и достаточным условием формирования соединений является образование области металлической связи заданных размеров и с требуемыми свойствами. Соединение возникает в результате протекания ряда физических процессов в несколько этапов, отличающихся фазовым состоянием металла, степенью его деформации, расположением поверхностных пленок и др. Особенности формирования соединений заключаются в нагреве преимущественно на воздухе в диапазоне температур 0,8 $T_{пл}$ — $T_{пл}$, малой длительности протекания тока и наличия усилия (давления). Обычно различают несколько этапов образования соединений.

Стыковая сварка сопротивлением протекает в два этапа (рис. 2). Первый из них начинается со сжатия деталей и включения тока. Микровыступы на торцах сминаются, и образуется электрический контакт.

На втором этапе осуществляется осадка деталей усилием $F_{ос}$. При этом металл интенсивно деформируется в направлении, обозначенном на рисунке стрелками, образуя утолщение. Сближение поверхностных атомов, образование физического контакта за счет смятия выступов и удаления окисных пленок и создание активных центров формирования металлической связи в твердой фазе по значительной площади осуществляются в процессе пластической деформации. Высокая температура торцов облегчает эту деформацию и способствует образованию центров взаимодействия вследствие термической активации атомов.

При стыковой сварке оплавлением формирование соединений представляется более сложным и обычно проходит в три этапа. На первом этапе детали сближаются под напряжением, и в участках контакта образуются перемычки жидкого металла, которые взрываются, образуя углубления — кратеры, заполненные жидким металлом. Основной металл при этом нагревается постепенно за счет передачи теплоты от стыка. Для выравнивания температур по сечению деталей иногда используют до начала оплавления предварительный подогрев стыка до 0,7—0,9 $T_{пл}$.

Второй этап характерен увеличением скорости оплавления — скорости образования и разрушения перемычек. Количество жидкого металла, находящегося на поверхности торцов, быстро возрастает вплоть до образования сплошной пленки расплавленного металла.

Третий тип начинается резким увеличением усилия — осадкой. Большая часть жидкого металла выдавливается из стыка в грат, и торцы подвергаются значительной пластической деформации. Вместе с этим металлом удаляется окисная пленка и образуется общая жидкая прослойка, между атомами которой возникает металлическая связь. Однако удалить полностью жидкость из кратеров невозможно,

и здесь соединение частично формируется в жидкой фазе. При кристаллизации расплава слабые металлические связи заменяются более прочными, характерными для твердого металла. Интенсивная пластическая деформация в стыке измельчает структуру литого металла. Таким образом, при сварке оплавлением создание физического контакта и активация атомов происходят за счет тепловой и механической энергии. Соединение образуется в твердо-жидком состоянии.

В условиях точечной и шовной сварки отмечается также три этапа формирования соединений. Первый этап (рис. 2, *в*) начинается с момента включения тока и сопровождается образованием электрического контакта, нагревом и расширением твердого металла, приводящего к увеличению зазоров, вытеснению под действием усилия металла в зазор и возникновению уплотняющего ядро пояска. На втором этапе происходит дальнейшее увеличение площади контактов, возникновение и рост расплавленного ядра до номинальных для данной толщины размеров — по диаметру и проплавлению. Помимо этого, наблюдается дробление и перераспределение поверхностных пленок в расплавленном металле и продолжаются процессы пластической деформации и теплового расширения, что приводит к росту зазоров и вмятины под электродами. С момента выключения основного импульса тока начинается третий этап. Металл охлаждается и происходит его кристаллизация.

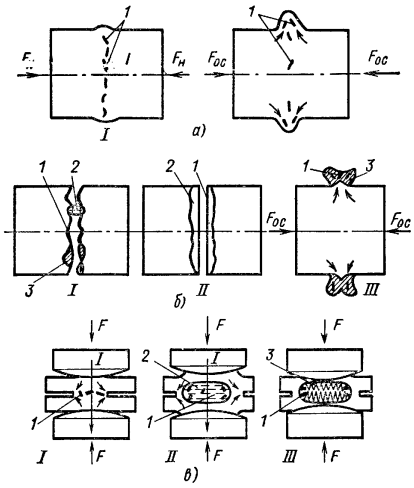


Рис. 2. Этапы формирования соединений при контактной сварке:

а — сопротивлением; *б* — оплавлением; *в* — при точечной и шовной сварке (*1* — окисные пленки; *2* — жидкий металл; *3* — литой металл)

К концу второго этапа поверхностные пленки под действием электродинамических сил и перемешивания металла удаляются с поверхности контакта, и формируется общая ванна расплавленного металла, между атомами которого устанавливается металлическая связь. Таким образом, на этом этапе фактически заканчивается формирование соединения. Активация атомов при этом способе соединения осуществляется в основном за счет тепловой энергии. В процессе кристаллизации на третьем этапе металлические связи упрочняются, и образуются соединения с требуемыми свойствами. Металлическая связь между деталями возникает и в области уплотняющего пояска. Однако здесь соединение происходит по весьма

ограниченной площади, так как степень пластической деформации весьма невелика и разрушение окисных пленок затруднено. Лишь при сварке титана и его сплавов, отличающихся высокой растворимостью окисной пленки при повышенных температурах, прочность соединения в этой зоне оказывается значительной. Роль усилия при этом способе сварки ограничивается созданием электрического контакта, образованием пластического пояска и регулированием условий кристаллизации металла.

В общем случае можно считать, что основными процессами, контролирующими формирование соединений при контактной сварке, являются нагрев металла, его пластическая деформация и удаление поверхностных пленок [8].

НАГРЕВ МЕТАЛЛА

Нагрев деталей при контактной сварке осуществляется за счет генерирования теплоты на электрических сопротивлениях при прохождении через них тока. Особенность нагрева состоит в малой длительности импульса тока и наличии резких градиентов температур.

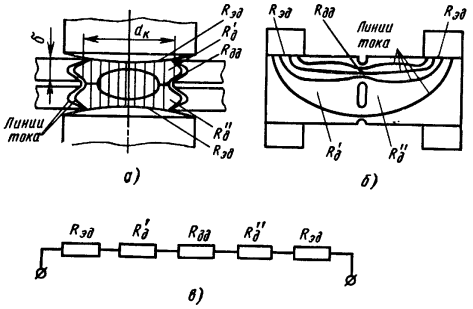


Рис. 3. Электрические сопротивления при точечной (*а*), и стыковой сварке (*б*); *в* — схема электрической цепи (δ — толщина детали; $d_к$ — диаметр контакта)

Электрические сопротивления. Количество теплоты, выделяемой на участке металла между электродами за время $t_{св}$, в соответствии с законом Джоуля — Ленца определяется формулой

$$Q_{ээ} = \int_0^{t_{св}} I^2(t)\, R_{ээ}(t)\, dt. \qquad (1)$$

Общее сопротивление $R_{ээ}$ обычно измеряется в микроомах и складывается (рис. 3) из контактных сопротивлений деталь — деталь ($R_{дд}$), электрод — деталь ($R_{эд}$) и собственных сопротивлений деталей ($R'_д$, $R''_д$):

$$R_{ээ} = R_{дд} + 2R_{эд} + R'_д + R''_д. \qquad (2)$$

При сварке деталей равной толщины (сечения) из одного и того же металла можно считать, что $R'_д = R''_д = R_д$.

В связи с тем, что отдельные составляющие $R_{ээ}$ существенно изменяются в процессе сварки, обычно рассматривают отдельно $R_{дд}$, $R_{эд}$ и $R_д$ при комнатной температуре и при нагреве. Повышенное сопротивление току в контактах объясняется ограниченностью площади фактического контакта и сопротивлением окисных пленок. Например, контакт электрода с деталью при точечной сварке происходит по отдельным микровыступам, что вызывает резкое уменьшение проводящего сечения, искривление и локальное сгущение линий электрического тока [2].

Распределение подобных элементарных контактов по поверхности соприкосновения деталей носит случайный характер, а общее сопротивление $R_{дд}$ и $R_{эд}$ зависит от сопротивления этих контактов и их количества, которые определяются состоянием поверхности и величиной сжимающего усилия. Например, сопротивление $R_{ээ}$ при сжатии двух пластин из низкоуглеродистой стали толщиной 3+3 мм усилием 200 кгс по схеме точечной сварки составило: при зачистке поверхности образцов наждачным кругом 100 мкОм; обработке резцом 1200 мкОм; при наличии ржавчины и окалины на поверхности — 80 000 мкОм. В холодном состоянии обычно $2R_д < R_{дд} + 2R_{эд}$, и поэтому $R_{ээ}$ в основном отражает величину контактных

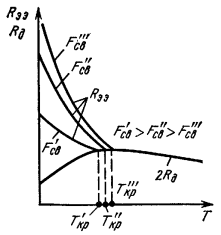


Рис. 4. Характер изменения сопротивлений при нагреве

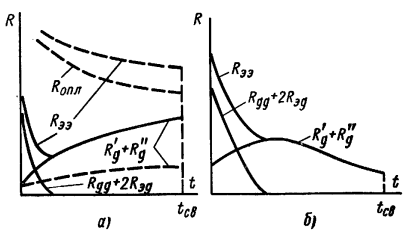


Рис. 5. Изменение сопротивлений в процессе стыковой (*а*) и точечной (*б*) сварки (——— сварка сопротивлением, ——— сварка оплавлением)

сопротивлений. С ростом усилия увеличивается площадь и число контактов за счет смятия неровностей и разрушения окисных пленок. Контактные сопротивления при этом уменьшаются и становятся более стабильными. При снятии усилия значения контактных сопротивлений оказываются ниже первоначальных, что свидетельствует о протекании необратимых процессов пластической деформации металла в контактах.

Контактное сопротивление электрод — деталь при точечной и шовной сварке обычно подчиняют соотношению $R_{эд} = 0{,}5R_{дд}$. При стыковой сварке сопротивления в контактах токоподводов с деталями значительно меньше $R_{ээ}$, и ими обычно пренебрегают.

В начале процесса сварки плотность тока в микроконтактах выше, чем в деталях. Нагрев металла облегчает пластическую деформацию выступов и разрушение окисных пленок под действием сжимающего усилия. Растет площадь и число контактирующих участков. При определенных для каждого металла температурах $T_{кр}$ и усилиях контактное сопротивление практически исчезает, и $R_{ээ} \simeq 2R_д$ (рис. 4). При этом с увеличением усилия снижается критическая температура. Для низкоуглеродистой стали $T_{кр} \simeq 600$ °С, а для алюминиевых сплавов $T_{кр} \simeq 350$° С. При точечной сварке снижение контактных сопротивлений происходит менее чем за $t = 0{,}1\, t_{св}$.

Процесс оплавления характерен малыми давлениями (0,2—0,7 кгс/мм²) и наличием между торцами отдельных перемычек — контактов. Сопротивление указанных перемычек и определяет контактное сопротивление, величина которого зави-

сит от числа одновременно существующих контактов, их размеров и температуры. Средние размеры единичного контакта растут с увеличением сечения деталей и скорости их сближения. Обычно при оплавлении $R_{опл}(R_{дд}) > R'_д + R''_д$ и оно может быть приближенно определено по следующей формуле:

$$R_{опл} = 9500 k_0 / S^{2/3} v_{опл}^{1/3} j,$$

где S — сечение свариваемых деталей, см²; $v_{опл}$ — скорость сближения деталей при оплавлении, см/с; j — плотность тока, А/мм²; k_0 — коэффициент, учитывающий свойства стали (для низкоуглеродистой и углеродистой стали $k_0 = 1$, для аустенитной стали $k_0 = 1{,}1$).

Среднее значение $R_{опл}$ при оплавлении стали сечением от 250 до 1000 мм² составляет 100—1500 мкОм. К концу процесса оплавления скорость сближения возрастает и из-за увеличения числа перемычек $R_{опл}$ уменьшается (рис. 5, *а*).

Собственное сопротивление «холодной» детали на участке между электродами (токоподводами) зависит от удельного сопротивления металла (ρ_0), длины и площади сечения этого участка (l_0 и S_0). Так при стыковой сварке

$$R_д = A_д k_п \frac{\rho_0 l_0}{S_0}, \qquad (3)$$

где $A_д$ — коэффициент, учитывающий относительные размеры и форму токоподвода; $k_п$ — коэффициент поверхностного эффекта.

Величина $k_п$, большая 1, в формуле (3) увеличивается с ростом частоты сварочного тока, магнитной проницаемости металла и диаметра деталей [5]. $A_д$ связана с характером подвода тока через зажимы. При одностороннем подводе, очевидно, линии тока удлиняются и поэтому $A_д > 1$ (рис. 3). Однако в расчетах часто принимают $A_д = 1$. Величина ρ_0 зависит от рода металла. Сплавы и особенно высоколегированные (например, сталь 12Х18Н9Т) отличается высоким значением $\rho_0 =$ $= 75$ мкОм·см. Нагартовка и некоторые виды термообработки приводят к увеличению ρ_0, например, после отжига сплав Д16 имеет $\rho_0 = 4{,}3$ мкОм·см, а после закалки и старения — 7,3 мкОм·см. Высоким сопротивлением отличаются также жаропрочные сплавы (ρ_0 до 120 мкОм·см) и сплавы на основе титана (ρ_0 до 150 мкОм·см).

При точечной сварке $R_д$ можно вычислить по формуле

$$R_д = A_д k_п \rho_0 \frac{\delta}{\frac{\pi d_к^2}{4}},$$

где δ — толщина детали; $d_к$ — диаметр контакта.

Обычно можно принять, что диаметры контактов электрод — деталь и деталь — деталь равны ($d_к \approx d_{эд} \approx d_{дд}$).

Вследствие относительно малой величины $d_к$ (5—10 мм) $k_п = 1$.

Ввиду ограниченности диаметра контакта по отношению к размерам детали (длине и ширине) наблюдается растекание тока вне поверхности цилиндра диаметром $d_к$ (рис. 3, *а*). Степень растекания тока и величина $A_д$ зависят от отношения $d_{к/\delta}$. С увеличением толщины ($d_к = \text{const}$) различие между сопротивлением детали ($R_д$) и цилиндра ($R_ц$) возрастает (рис. 6).

Диаметр контакта при использовании электродов со сферической рабочей поверхностью ориентировочно определяется по формуле

$$d_к = \sqrt{\frac{4F_{св}}{\pi \sigma^*_д}},$$

где $\sigma^*_д$ — условное сопротивление пластической деформации при комнатной температуре, которое может быть принято 100 кгс/мм² для низкоуглеродистой стали и 25 кгс/мм² для алюминиевых сплавов АМг6 и Д16.

Нагрев при стыковой сварке приводит к монотонному увеличению $R_д$ в связи с ростом удельного электросопротивления (см. рис. 5, *а*). Особенно заметно возрастает $R_д$ при стыковой сварке сопротивлением, так как плотность тока выше, чем при сварке оплавлением. Значения l и S в процессе нагрева изменяются незначительно и не оказывают существенного влияния на $R_д$.

Характер изменения $R_{ээ}$, $2R_{эд} + R_{дд}$ и $R'_д + R''_д$ при точечной сварке деталей равной толщины показан на рис. 5, *б*. Первый период характерен быстрым спадом $R_к$ и нарастанием $R_д$ за счет увеличения ρ. Во втором периоде наблюдается постепенное снижение $R_{ээ}$ и $R_д$ за счет расширения площади контактов. Особенно значительное увеличение $d_к$ происходит при сварке электродами со сферической рабочей поверхностью. За цикл сварки $R_{ээ}$ снижается в несколько раз. Например, при сварке коррозионно-стойких сплавов $R_{ээ}$ уменьшается с 300—500 мкОм до 100—150 мкОм, алюминиевых сплавов с 50—100 до 10—15 мкОм. Характер зависимости $R_{ээ}(t)$ может меняться, в основном, в первом периоде для различных металлов,

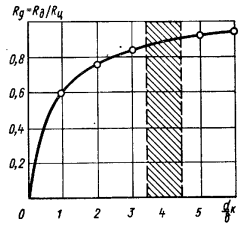


Рис. 6. Значения коэффициента $A_д$. Наиболее распространенная область $d_к/\delta$ заштрихована

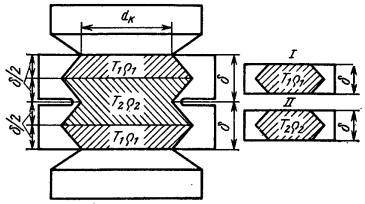


Рис. 7. Схема расчета электрического сопротивления

отличающихся значением температурного коэффициента удельного электросопротивления α_ρ. В частности, для чистых металлов α_ρ велико (0,004 1/°С) и в указанном периоде наблюдается возрастание $R_{ээ}$.

Для оценки сопротивлений деталей в процессе нагрева используют средние значения температуры α_ρ и $\rho_т$ или ведут расчет методом конечных разностей по известному температурному полю [8]. Для оценки сопротивлений деталей при точечной сварке к концу процесса нагрева ($2R_{д кон}$) принимается условная схема теплового состояния. Считается, что сопротивление двух пластин одинаковой толщины δ (рис. 7) можно представить как сумму сопротивлений двух пластин I и II, нагретых до средней постоянной температуры T_1 и T_2. Тогда при $d_{к кон} =$ $= d_{э д кон} = d_{дд кон}$

$$2R_{д кон} = \frac{A_д k_н \delta}{\frac{\pi d^2_{к кон}}{4}} (\rho_1 + \rho_2),$$

где ρ_1 и ρ_2 — соответственно удельные электросопротивления пластин для температур T_1 и T_2; $k_н$ — коэффициент, учитывающий неравномерность нагрева деталей (для стали $k_н = 0{,}85$ $T_1 = 1200$°С и $T_2 = 1500$°С); $d_{к кон}$ — диаметр контакта к концу нагрева.

Аналогичную формулу применяют для расчета сопротивления детали при стыковой сварке

$$R_{д кон} = A_д k_н \rho_т \frac{l_{кон}}{S_0},$$

где $\rho_т = \rho_0(1 + \alpha_\rho T_{ср})$; $T_{ср}$ — средняя температура нагрева детали (при сварке стали сопротивлением $T_{ср} = 0{,}8\ T_{пл}$, оплавлением $T_{ср} = 0{,}57 T_{пл}$).

Электрическое и температурное поле. Температура различных участков металла в разные моменты времени зависит от тепловыделения (интенсивности источников теплоты) и теплоотвода в соседние, более холодные участки, а также потерь энергии в окружающее пространство, например, при выбросе оплавленного металла, конвективном и радиационном теплообмене со средой и т. п. Температурное поле при контактной сварке отличается значительной неравномерностью и быстрым изменением во времени. Общее количество тепловой энергии, выделяемой в зоне сварки при прохождении тока, определяют по формуле (1). При точечной (шовной) и стыковой сварке сопротивлением принимают, что основная часть теплоты при правильно подготовленной поверхности выделяется на сопротивлении детали $R_д$. При сварке оплавлением бо́льшая доля энергии выделяется на контактных сопротивлениях.

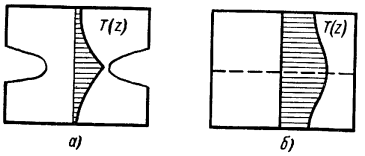


Рис. 8. Распределения температуры в зоне контакта деталь — деталь на ранней (*а*) и поздней (*б*) стадиях процесса

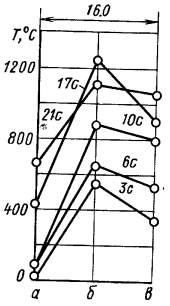


Рис. 9. Изменение температуры в процессе сварки сопротивлением полос из стали Ст3 сечением 160 × 3 мм на расстоянии 1 мм от стыка:
а, в — края листа; *б* — середина листа

Контактные сопротивления проявляются в большей степени при малых усилиях, небольшой длительности протекания тока, наличии на поверхности пленок с высоким электрическим сопротивлением, например фосфатных покрытий на стали, сварке металлов с малой теплопроводностью и тонких деталей (при микросварке). Обычно при точечной, шовной сварке и сварке сопротивлением доля энергии, генерируемой на этих сопротивлениях, не превышает 10—15%. Теплота, выделяемая в контакте преимущественно в начале процесса нагрева, обеспечивает локальное повышение температуры и удельного электросопротивления металла. Несмотря на то, что в дальнейшем $R_{дд}$ быстро уменьшается, его роль продолжает сказываться до конца цикла сварки, так как повышенное местное сопротивление металла способствует интенсивному выделению теплоты (рис. 8). Значение контактных сопротивлений по поверхности нагрева неравномерно, что определяет случайный характер температурного поля и наличие значительных градиентов температур по сечению деталей, например, при стыковой сварке сопротивлением (рис. 9). При сварке оплавлением энергия в основном выделяется на контактных сопротивлениях — перемычках жидкого металла.

Определенную роль в тепловыделении могут играть источники теплоты, связанные с эффектом Пельтье, который проявляется в выделении или поглощении теплоты в контакте двух разнородных металлов (электрод — деталь) или на границе твердой и жидкой фаз (ядра и твердого металла). В частности, если направление тока таково, что через контакт переносятся электроны из металла, в котором их энергия относительно больше, то температура в этом контакте повышается.

Количество теплоты пропорционально сварочному току, времени нагрева и зависит от свойств свариваемого и электродного металлов [8]. Однако доля этой теплоты в общем балансе энергии обычно не превышает 5—10%.

Роль собственных сопротивлений как источников тепла возрастает при больших $F_{св}$, большой длительности протекания тока, сварке металлов с большим сопротивлением и т. д.

В зависимости от времени нагрева (длительности импульса) условно различают жесткие и мягкие режимы. Жесткие режимы характеризуются мощными импульсами тока малой продолжительности (обычно $<0{,}1$ с при точечной сварке толщин 1—4 мм) при относительно небольших деформациях и существенной роли контактных сопротивлений. Температурное поле определяется при этом в основном тепловыделением (распределением плотности тока). Мягкие режимы отличаются значительной длительностью протекания тока в условиях интенсивного теплообмена в самих деталях и между деталями и электродами. В этих условиях значительное развитие получают процессы пластической деформации металла.

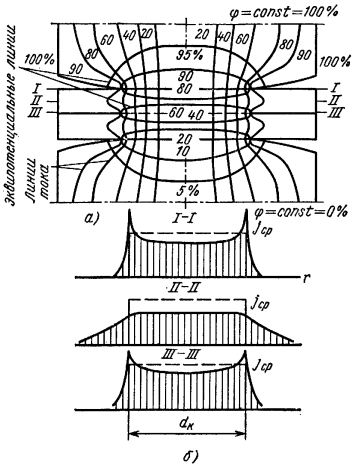


Рис. 10. Данные расчета на ЭВМ:
а — характер электрического поля; *б* — распределения плотности тока по оси *r* при точечной сварке: $d_к = d_{эд} = d_{дд} = 5{,}6$ мм; $\delta = 1{,}2$ мм. Удельные сопротивления металла электродов и деталей соответственно 2 и 6 мкОм·см. Данные по *j* приведены в относительной форме: $j = i_r/i_{ср}$, где $i_{ср} = I \Big/ \frac{\pi d_к^2}{4}$

Тепловыделение в объеме металла определяется электрическим полем, которое описывается полями напряжений и плотностей тока [8]. Для контактной сварки в общем случае характерно неравномерное электрическое поле, что объясняется действием следующих факторов:

геометрического фактора, связанного с геометрией соединения и схемой токоподвода, с ограниченностью размеров микроконтактов и контактов электрод — деталь по сравнению с размерами деталей, односторонним подводом тока, шунтированием и т. п.;

температурного фактора, проявляющегося в обтекании током более нагретых участков, отличающихся пониженной проводимостью в условиях неравномерного температурного поля и поля сопротивлений;

магнитоэлектрического фактора, определяемого поверхностным эффектом, эффектом близости и т. д.

Иллюстрацией влияния первого фактора служит электрическое поле в равномерно нагретых деталях при точечной сварке (рис. 10). Электрическое поле симметрично относительно оси *Z*, и плотность тока *j* зависит от координат *z* и *r*.

Наибольшая плотность тока в сечениях *I* и *III* достигается вблизи границ контактов. В сечении *II* плотность тока около оси *Z* практически постоянна и быстро убывает за пределами контакта. Степень неравномерности поля зависит от $d_к/\delta$. Например, при $d_к/\delta = 3{,}3$ около 25% силы тока протекает вне поверхности цилиндра с диаметром основания $d_к$, а при $d_к/\delta = 5$ лишь 15% силы тока.

Неравномерность поля зависит также от конструкции электрода — его размеров, расположения охлаждающего канала и т. д. [8, 9].

Шунтирование тока проявляется в протекании части тока вне зоны сварки, что может вызвать изменение формы, размеров и прочности шва. Так, при двусторонней точечной и шовной сварке ток шунтируется через ранее сваренные точки или участки шва (рис. 11,*а*). Величина токов шунтирования возрастает с уменьшением шага между точками $t_ш$ и удельного электросопротивления металла, с увеличением толщины деталей, диаметра ядра или сечения шва и ширины b свариваемой детали. Токи шунтирования $I_ш$ велики лишь в начальной стадии, когда $\frac{z_ш}{R_{св}}$ относительно мало.

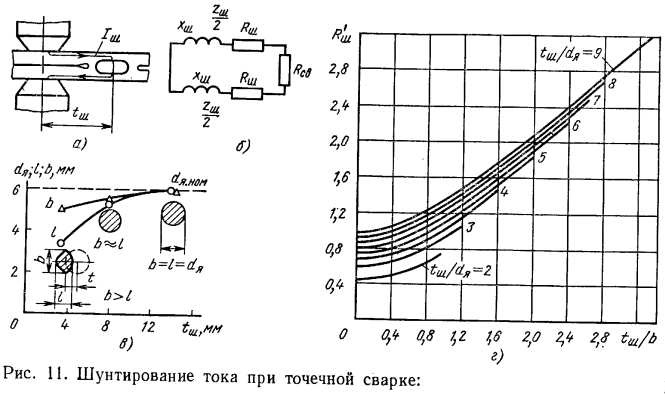


Рис. 11. Шунтирование тока при точечной сварке:

а — схема шунтирования при двустороннем подводе тока; *б* — эквивалентная электрическая схема; *в* — размеры и форма ядра в зависимости от шага (сплав 12Х18Н10Т) толщиной 1,5 + 1,5 мм; *г* — график для расчета сопротивления шунта

Дальнейший нагрев металла током вызывает повышение сопротивления шунтирующей ветви и резкое снижение токов шунтирования. Тем не менее при малом шаге шунтирование оказывает влияние на размеры и форму ядра (рис. 11, *в*). Для каждого сочетания толщин и разных металлов существует минимальное значение технологического шага, обеспечивающее одинаковые размеры и прочность всех точек шва (см. табл. 3).

При шовной сварке плотных швов шунтирование компенсируется увеличением силы тока на 15—25% по сравнению с силой тока при точечной сварке аналогичных деталей. Шунтирование тока имеет большое значение при односторонней сварке. Без применения токопроводящей подкладки (рис. 12) ($I_н = I_{св}$) $\gg I_ш$, так как $z_ш < z_н + 2R_{дд}$. Колебание $R_{дд}$ приводит к изменениям $I_{св}$ и размеров ядра и поэтому такой способ сварки используется редко. Лишь в том случае, когда соотношение толщин верхней и нижней детали < 3 или сопротивление нижней детали относительно мало, процесс сварки становится более устойчивым. Обычно односторонняя сварка производится с использованием токоведущей медной подкладки, через которую протекает большой ток $I_п$. При этом $I_{св} = I_н + I_п$ значительно превышает $I_ш$. Ток шунтирования возрастает с уменьшением $t_ш$ и $z_ш$ и при увеличении $z_н$ и $z_п$. Сопротивление шунта рассчитывают по формуле

$$z_ш = \sqrt{(k_п R_ш)^2 + x_ш^2},$$

где $k_п$ — коэффициент поверхностного эффекта, значение которого при сварке деталей из немагнитных металлов толщиной более 2 мм близко к единице; $x_ш$ — индуктивное сопротивление шунта, стремящееся при большой плотности тока

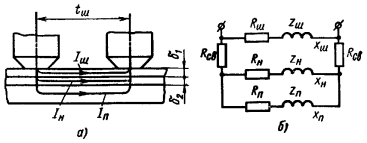


Рис. 12. Распределение токов (*а*) и эквивалентная электрическая схема (*б*) при односторонней сварке; $I_н$, $I_п$ и $R_н$, $X_н$, $R_п$, $X_п$ — соответственно токи и сопротивления нижнего листа и подкладки

к нулю; $R_ш$ — активное сопротивление шунта. При указанных условиях $z_ш \approx R_ш$. С другой стороны,

$$R_ш = R'_ш \frac{\rho_т}{b},$$

где $\rho_т$ — среднее удельное сопротивление шунта; b — ширина листа; $R'_ш$ — относительное сопротивление, зависящее от безразмерных параметров; $\frac{t_ш}{d_я}$ и $\frac{t_ш}{b}$ (см. рис. 11, *г*).

Большие токи шунтирования вызывают повышение плотности тока в контактах электрод — деталь, что часто сопровождается перегревом поверхности верхней детали и наружным выплеском [9].

При стыковой сварке с односторонним подводом тока через зажимы наибольшая плотность тока отмечается в участках, расположенных ближе к токоподводам. При сварке кольцевых деталей из-за шунтирования тока требующаяся мощность увеличивается на 15—50% по сравнению с соединением деталей незамкнутой формы. $I_ш$ возрастает с уменьшением сопротивления шунта (сечения кольца) и определяется по формуле

$$I_ш = I_{св} \frac{R_{дд} + R'_д + R''_д}{\sqrt{R_ш^2 + x_ш^2}}.$$

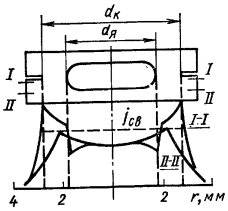


Рис. 13. Характер распределения плотности тока при наличии расплавленного ядра (расчет на ЭВМ); $R_{эд} = R_{дд} = 0$

Температурный фактор наглядно проявляется при точечной и шовной сварке (рис. 13). В сечении *I—I* наименьшая плотность тока отмечается в ядре — зоне с наибольшим сопротивлением.

Роль магнитоэлектрических факторов особенно заметна при нагреве ферромагнитных металлов токами повышенной и радиочастоты, что вызывает концентрацию плотности тока на поверхности (поверхностный эффект) и на периферии близкорасположенных проводников, когда по ним протекает ток противоположной направленности. При этом наибольшая плотность тока отмечается в соседних участках проводников (эффект близости). Иногда магнитоэлектрические явления используют для искусственного повышения плотности тока в зоне соединения, например за счет внешнего магнитного поля при точечной сварке.

При стыковой сварке сопротивлением в процессе нагрева необходимо обеспечить получение заданной и равномерно распределенной температуры в стыке и прогреть металл околошовной зоны для достаточной деформации металла при осадке. Начальный период цикла сварки характеризуется

относительно малым усилием, что способствует эффективному использованию $R_{дд}$ как источника теплоты. Более равномерный нагрев стыка достигается при увеличении длительности процесса и специальной подготовке поверхности деталей, например, снятием фасок на торцах труб [2, 5]. Между j и $t_{св}$ установлено соотношение

$$j\sqrt{t_{св}} = k \cdot 10^3,$$

где k — коэффициент, зависящий от свариваемого металла и площади сечения деталей [2].

При чрезмерном увеличении j возможен выплеск, а при уменьшении $t_{св}$ возникают большие градиенты температур. Характер распределения температур по длине деталей (оси X) зависит от их установочной длины, которая определяется устойчивостью деталей при осадке и теплоотводом в токоподводы (рис. 14). Обычно указанная длина не превышает диаметр или трех—четырех толщин деталей.

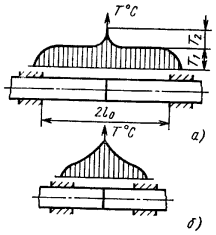


Рис. 14. Схема распределения температуры по длине деталей при сварке сопротивлением при большой (*а*) и малой (*б*) установочной длине $2l_0$

При расчете нагрева деталей температуру $T(x_1, t)$ представляют суммой двух температур $T(x, t) = T_1(t) + T_2(x, t)$, где $T_1(t)$ — температура нагрева бесконтактного стержня неограниченной длины током, работающим на сопротивлении стержня, линейно возрастающим с температурой; $T_2(x, t)$ — температура нагрева такого же стержня неограниченной длины мгновенным приконтактным источником.

Температура нагрева стержня током $T_1(t)$ выражается экспоненциальным законом

$$T_1(t) = \frac{1}{\beta}(\exp \beta\omega_0 t - 1),$$

где $\omega_0 = 0{,}24\frac{\rho_0}{(c\gamma)_0} j^2$ — начальная скорость нагрева, град/с; j — плотность тока, А/см²; β — температурный коэффициент возрастания отношения $\rho/c\gamma$.

Температуру $T_2(x, t)$ определяют по формуле

$$T_2(x, t) = \frac{Q_2}{\bar{c}\bar{\gamma}\sqrt{4\pi\bar{a}t}} \exp\left(\beta\omega_0 t - \frac{x^2}{4\bar{a}t}\right),$$

где $Q_2 = \dfrac{k\sqrt{\bar{\lambda}\bar{c}\bar{\gamma}}}{\beta j\sqrt{0{,}24\beta\rho_0 (c\gamma)_0}}$ — общее количество теплоты, выделяемое в контакте за время сварки, отнесенное к единице площади контакта; $\bar{c}$, $\bar{\lambda}$, $\bar{a}$ — средние значения удельной теплоемкости, коэффициента теплопроводности и коэффициента температуропроводности в процессе нагрева.

Коэффициент k характеризует интенсивность тепловыделения в контакте и зависит от свойств металла и давления. Экспериментально получены следующие значения коэффициента k: 2,6 —3,0— сталь 10; 2,0—2,3 — сталь 45; 0,07—0,08 — сталь 12Х18Н9Т; 0,34—0,36 — алюминий; 0,14—0,15 — медь. Бо́льшим давлениям соответствуют меньшие значения k.

При стыковой сварке оплавлением в процессе нагрева необходимо обеспечить получение на торцах свариваемых деталей пленки расплавленного металла (толщиной 0,1—0,5 мм) и такое распределение температур в околошовной зоне, которое дало бы возможность деформировать металл при осадке (на 5—30 мм) и удалить расплав и окислы из стыка. Нагрев происходит в основном

за счет выделения теплоты на контактах или перемычках жидкого металла. При сближении деталей под напряжением и малом давлении между твердыми или жидкими поверхностями образуется электрический контакт. Нагрев контакта проходящим током вызывает появление между торцами перемычек из жидкого металла, которые непрерывно разрушаются. Длительность существования отдельных контактов 0,001—0,005 с. На жидкую перемычку (рис. 15,*а*), помимо сил поверхностного натяжения σ, действуют электромагнитные силы F_c. Осевая составляющая F_0 этих сил вызывает стягивание перемычки, увеличение плотности тока и скорости нагрева. Ее определяют по формуле

$$F_0 = 1{,}02 \cdot 10^{-5} I^2 \ln\frac{D_п}{d_п},$$

где $D_п$ и $d_п$ — соответственно диаметры основания и середины перемычки.

При взаимодействии тока в перемычке с магнитным полем сварочного контура возникают дополнительные электромагнитные силы $F_к$ (рис. 15,*б*), пропорциональ-

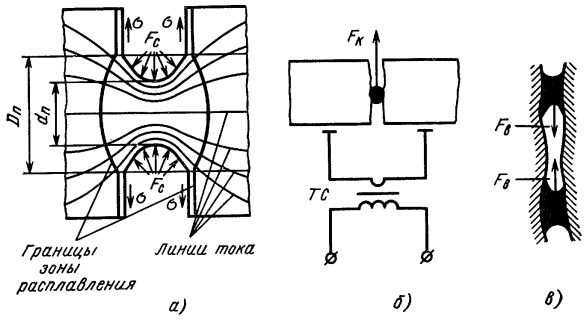


Рис. 15. Силы, действующие на перемычки при сварке оплавлением

ные квадрату силы тока и связанные с коэффициентом самоиндукции сварочной цепи, стремящиеся переместить перемычку в зазоре и вытолкнуть ее за пределы контура. При наличии между торцами нескольких перемычек существуют также электромагнитные силы $F_в$ (рис. 15,*в*), вызывающие сближение и объединение этих перемычек. Интенсивный нагрев и действие электродинамических сил приводят к возникновению больших градиентов температур и давлений по сечению перемычки. При достаточно большой плотности тока (например, около 3000 А/мм²) при оплавлении низкоуглеродистой стали) металл в центре перемычки испаряется и происходит ее взрывообразное разрушение. Большая часть металла под действием силы $F_к$ выбрасывается в сторону, противоположную сварочному контуру. Давление паров в момент взрыва достигает сотен атмосфер, а температура 6000—8000°С. При взрыве контакта и размыкании торцов деталей энергия, запасенная в магнитном поле контура сварочной машины, способствует образованию перенапряжения и возникновению кратковременного дугового разряда, который может дополнительно нагревать металл. Возникновение следующей перемычки шунтирует дугу и она гаснет. Роль дугового разряда повышается при малой длительности существования перемычек, небольшой работе выхода электронов и большой индуктивности контура. Например, при оплавлении алюминиевых сплавов до 50% тепловой энергии приходится на долю дуговых разрядов. Роль этих разрядов снижается при сварке больших сечений, так как в этом случае увеличивается количество

одновременно существующих контактов, время их существования и снижается вероятность полного размыкания цепи [8].

Процесс образования и разрушения контактов-перемычек носит случайный характер и сопровождается характерными пульсациями силы тока и напряжения [5, 8], которые в основном происходят в средней части полуволны. Амплитуда и цикличность импульсов тока при использовании источника постоянного напряжения меньше, что свидетельствует о меньшем размере перемычек и более ровном рельефе поверхностей. Поэтому сварка на постоянном токе рекомендуется для небольших сечений.

Условие непрерывного оплавления состоит в соответствии мгновенных скоростей сближения и оплавления деталей. В частности, скорость оплавления

$$v_{опл}=\frac{0{,}24R_{опл}I^2-2\lambda S dT/dx}{\gamma S\left[c\left(T_{опл}-T_1\right)+m_0\right]}, \quad (4)$$

где λ — коэффициент теплопроводности; c — теплоемкость; dT/dx — градиент температур у торца (для стали 2000—5000°С/см); γ — плотность; $T_{опл}$ — средняя температура выбрасываемого при оплавлении металла (для стали $T_{опл}\approx 2000$°С); T_1 — температура торцов (в начале непрерывного оплавления — комнатная температура, к концу его — $T_1\approx T_{пл}$); m_0 — скрытая теплота плавления металла.

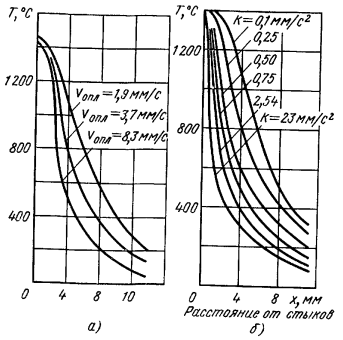


Рис. 16. Распределение температуры по длине деталей при оплавлении стальных пластин (состояние, близкое к квазистационарному): *а* — оплавление с постоянной скоростью; *б* — оплавление с различными ускорениями k (по параболическому закону)

По мере оплавления, как это следует из формулы (4), $v_{опл}$ увеличивается.

Устойчивое оплавление возможно лишь при саморегулировании процесса, когда увеличению проводимости контакта соответствует возрастание полезной мощности, развиваемой сварочной машиной. Для обеспечения устойчивого оплавления необходимо применять машины с низким сопротивлением короткого замыкания и в особенности его активной составляющей [5, 8].

При разрушении перемычек на торцах образуются кратеры, заполненные жидким металлом. Глубина их может достигать от 0,1—0,2 мм до нескольких миллиметров (большие сечения). С увеличением размеров перемычек макрорельеф поверхности ухудшается. В результате разрушения перемычек поверхность деталей многократно обновляется. По мере оплавления средняя температура торцов растет и на них постепенно образуется слой расплавленного металла, толщина которого к концу процесса при сварке деталей небольших сечений составляет 0,1—0,3 мм. Формирование расплавленного слоя облегчается с уменьшением скорости сближения деталей и уменьшением градиента температур на торцах. На характер температурного поля в деталях оказывают влияние скорость оплавления, ускорение (рис. 16), напряжение холостого хода трансформатора (U_{xx}) и связанная с ним плотность тока.

При увеличении скорости нагрева и ускорения возрастает градиент температур и сужается зона нагрева. Однако уменьшение скорости оплавления ниже определенного критического значения приводит к снижению средней температуры торцов и степени нагрева самих деталей. При сварке углеродистой стали наибольшее количество тепла передается в детали при средних значениях $v_{опл}=0{,}2\div 0{,}3$ мм/с, а при оплавлении алюминиевых сплавов — при $v_{опл}=3\div 5$ мм/с. Критическая скорость оплавления уменьшается при увеличении сечения деталей. При сварке металлов с большой температуропроводностью (медь, алюминий, молибден) детали прогреваются на значительную глубину. Уменьшение U_{xx} приводит к повышению температуры торцов. Это объясняется тем, что в указанных условиях сокращается интенсивность разрушения контактов — перемычек, растет длительность их существования и больше расплавленного металла остается на торцах. Однако низкие напряжения характерны неустойчивостью оплавления, что вызывает необходимость использования специальных программаторов скорости [8].

При сварке деталей крупных сечений весьма эффективно применение игнитронных регуляторов напряжения. При этом наличие пауз в протекании тока увеличивает длительность существования контактов и прогрев деталей. В периоды неустойчивого оплавления для предотвращения короткого замыкания цепи имеется возможность кратковременного повышения напряжения.

Одним из способов расширения зоны нагрева является импульсное оплавление, при котором на основное поступательное движение подвижного зажима накладываются дополнительные колебания, что вызывает периодическое уменьшение зазора и механическое разрушение контактов [6]. Такой характер разрушения контактов, когда они существуют в твердой фазе, приводит к значительному уменьшению объема металла, выплавляемого при взрыве контактов, повышает интенсивность нагрева и устойчивость оплавления.

Для обеспечения более глубокого прогрева деталей иногда используют предварительный подогрев, который облегчает возбуждение оплавления и снижает необходимую для этого процесса мощность. Ток подается при подогреве отдельными импульсами длительностью 0,5—4,0 с, чередующимися с паузами приблизительно такой же длительности. По аналогии со сваркой сопротивлением подогрев вызывает неравномерность нагрева по сечению детали, однако паузы между импульсами способствуют уменьшению градиентов температур. С увеличением усилия нагрев становится более равномерным, но при этом резко возрастает потребляемая при подогреве мощность, так как основная доля теплоты выделяется на собственном сопротивлении деталей. В ряде случае, например при сварке труб, подогрев осуществляют с помощью кольцевых индукторов.

При оплавлении также возможно появление значительных градиентов температур по сечению, что связано с направленным перемещением металла в зазоре и более интенсивным оплавлением детали у внешней (по отношению к контуру) кромки. Односторонний подвод тока и увеличение его частоты повышают неравномерность нагрева сечения.

Эффективность нагрева деталей характеризуется термическим КПД процесса оплавления

$$\eta_т=\frac{q'''_{опл}}{q_{опл}},$$

где $q_{опл}$ — тепловая мощность, выделяемая на контактном сопротивлении, равная $0{,}24R_{опл}I^2$.

$$q_{опл}=q'_{опл}+q''_{опл}=v_{опл}S\gamma\left[c\left(T_{опл}-T_1\right)+m_0\right]+2\lambda S\frac{dT}{dx},$$

где $q'_{опл}$ — мощность, расходуемая на нагрев металла от T_1 [см. формулу (4)] до $T_{опл}$; $q''_{опл}$ — мощность, расходуемая на теплопередачу в оплавляемые детали.

В свою очередь,

$$q'''_{опл}=q''_{опл}-Sv_{опл}c\gamma T_1,$$

где $Sv_{опл}c\gamma T_1$ — количество теплоты, уже имеющееся в нагретых деталях и удаляемое из них с выплавляемым металлом.

Значение $\eta_т$ растет с уменьшением $v_{опл}$, T_1 и $U_{хх}$ и достигает 0,5—0,6 в начале процесса. При приближении к квазистационарному состоянию $\eta_т = 0$, так как при этом теплосодержание деталей остается постоянным и $q'''_{опл} = 0$.

Нагрев в условиях точечной и шовной сварки теплотой, выделяемой на электрических сопротивлениях деталей, обеспечивает получение ядра заданных размеров. Кроме того, как и при стыковой сварке, необходимо нагреть участки, непосредственно примыкающие к ядру, для облегчения процессов пластической деформации и формирования уплотняющего пояска. Повышение температуры этих участков происходит как за счет тепловыделения при прохождении через них тока, так и в результате передачи теплоты от ядра.

Температурное поле при этом отличается очень быстрым изменением температур (до 20 000 °С/с) и резкими градиентами температур (до 30 000°С/см). Поле симметрично относительно оси Z и поэтому изотермы в сечениях, параллельных поверхности деталей, имеют форму окружностей.

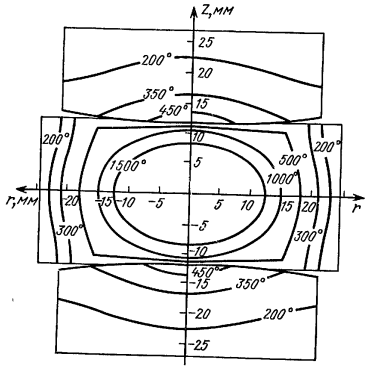


Рис. 17. Температурное поле к концу точечной сварки низкоуглеродистой стали толщиной 12 + 12 мм (данные расчета на ЭВМ)

Расплавленное ядро, образуется лишь спустя некоторое время с момента включения тока, составляющее в среднем (0,3÷0,5) $t_{св}$. По мере прохождения тока ядро продолжает расти, достигая определяемых режимом размеров. С увеличением крутизны нарастания тока скорость роста ядра возрастает. Температурное поле рассматривается в момент выключения тока, так как в это время температуры, как правило, достигают максимальных значений. Около ядра (рис. 17) изотермы представляются в виде замкнутых кривых, на удалении от него — это почти прямые линии, перпендикулярные к оси r. Наибольшие градиенты температур — в направлении оси Z. Обычно выделяют максимальные температуры в контакте электрод — деталь. Считают, что она в среднем составляет 0,5 $T_{пл}$ свариваемого металла. Однако при увеличении времени сварки, температуропроводности металла (рис. 18) и темпа сварки эта температура заметно возрастает.

При сварке деталей одинаковой толщины плавление металла происходит в области, примыкающей к контакту деталь — деталь (в наиболее горячей зоне), отличающейся повышенной плотностью тока, сравнительно малыми градиентами температур и относительно небольшим теплообменом с электродами.

Температурное поле и размеры ядра можно регулировать за счет изменения величины энергетических параметров — силы тока, длительности его протекания и сварочного усилия (рис. 19). Увеличение силы тока и времени сварки приводит к росту ядра. Однако при данном усилии существует предельное (критическое) значение диаметра ядра, так как дальнейшее повышение I и $t_{св}$ приводит к выплеску. С ростом усилия ядро уменьшается в результате развития пластической деформации, увеличения площади контактов и снижения плотности тока.

При шовной сварке источник теплоты перемещается и теплота вводится отдельными импульсами. В этом случае сказывается эффект шунтирования тока, подогрев металла теплотой от предыдущей точки и охлаждение металла в паузе за счет теплопередачи. Нагрев металла околошовной зоны происходит в основном

позади ролика, и изотермы, как и при дуговой сварке, вытянуты в направлении, обратном движению роликов. На размеры зоны расплавления оказывают также влияние время паузы между импульсами, скорость сварки и шаг точек.

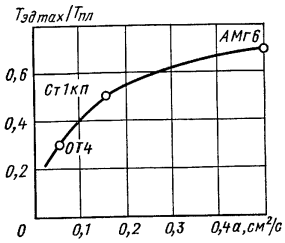


Рис. 18. Относительная максимальная температура в контакте электрод — деталь $\left(\frac{T_{эд\,max}}{T_{пл}}\right)$ в зависимости от температуропроводности металла

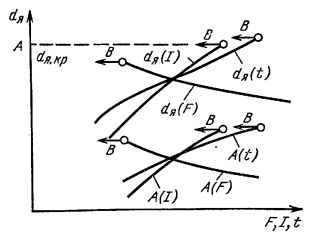


Рис. 19. Характер зависимости диаметра ядра $d_я$ и проплавления (A) от параметров режима сварки (B — момент выплеска металла)

Сварка деталей малой толщины (≤0,1 мм) производится при малых значениях $F_{св}$ на жестких режимах, что повышает роль контактных сопротивлений и способствует концентрированному тепловыделению в контакте деталь — деталь. При этом необходимо стабилизировать силу тока, длительность его протекания и сварочное усилие.

Сварка деталей большой толщины (>4—6 мм), отличающихся значительной жесткостью, требует высоких сварочных и ковочных усилий при относительно мягком режиме. В этих условиях наблюдается повышение температуры в контакте электрод — деталь и повышенный износ электродов. Для соединения таких деталей используют многоимпульсные режимы (чередование импульсов тока и пауз). Подобным способом удается накопить достаточное количество теплоты для образования ядра и за счет интенсивного теплоотвода за время пауз заметно снизить температуру в контакте и уменьшить износ электродов [8].

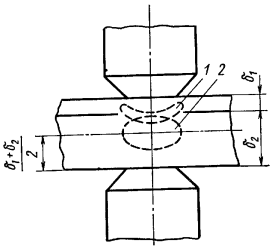


Рис. 20. Форма областей максимальных температур при точечной сварке деталей неравной толщины на жестком *1* и мягком *2* режимах

Сварка деталей неравных толщин (обычно при соотношении толщин >3:1) связана с трудностью обеспечения достаточного (не менее 20%) и стабильного проплавления тонкой детали. Это связано с тем, что при мягких режимах наибольшие температуры достигаются в центре тяжести сечения деталей, не совпадающем с зоной контакта деталь — деталь (рис. 20). Таким образом, вероятность проплавления тонкой детали снижается с ростом соотношения толщин и с уменьшением толщины тонкой детали. В этом случае часто наблюдается образование непроваров. При жестком режиме сварки вероятность достаточного проплавления тонкой детали увеличивается, так как центр тепловыделения смещается

к контакту деталь — деталь. Однако в этом случае процесс остается неустойчивым ввиду частого образования внутренних выплесков (а при толщине тонкой детали $<0{,}3$ мм и наружных выплесков), появление которых связано с повышенной плотностью тока на периферии шва из-за растекания тока в толстой детали, а также с повышенной деформацией тонкой детали. Для получения устойчивого и достаточного проплавления тонкой детали разработан ряд приемов сварки. Например, для уменьшения теплоотвода от тонкой детали при мягких режимах используют тепловые экраны [8, 9]. При жестких режимах для снижения концентрации тока на периферии контакта и деформации тонкой детали применяют рельефы, фокусируют ток с помощью электрода с проточкой или спирального электрода — соленоида, а для предотвращения выплеска применяют обжатие периферии контакта автономным давлением [8].

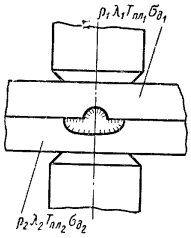


Рис. 21. Точечная сварка разнородных металлов [1]

Условия образования сварного шва при соединении разнородных металлов одинаковой толщины зависят от их физико-механических свойств (ρ, λ, $T_{пл}$, $\sigma^*_д$). Обычно сечение шва меньше в той детали, металл которой обладает относительно малыми ρ, $\sigma^*_д$ и большими λ и $T_{пл}$ (рис. 21). При значительном различии в свойствах металлов может наблюдаться отсутствие расплавления одной из деталей, особенно при сварке на мягких режимах. При очень жестких режимах и сварке деталей малых толщин иногда удается получить равномерное расплавление в зоне контакта деталь — деталь. Однако при получении благоприятной формы шва пластичность и прочность соединений зависят от характера и степени химического взаимодействия металлов (вида диаграммы состояния). В большинстве случаев при сварке разнородных металлов, например магния с алюминием, титана со сталью, образуются хрупкие интерметаллиды [8]. Поэтому контактной сваркой обычно успешно соединяются сплавы на одной основе (АМг6 с Д16, Ст1кп с 12Х18Н9Т и т. д.) либо металлы, образующие твердые растворы (никель — сталь, титан — цирконий и т. п.) [4, 9].

Для оценки эффективности нагрева металла при точечной и шовной сварке используют термический КПД

$$\eta_т=\frac{Q_1}{Q_{ээ}},\quad Q_{ээ}=Q_1+Q_2+Q_3,$$

где Q_1, Q_2, Q_3 — теплота, расходуемая на плавление металла, нагрев зоны термического влияния и нагрев электродов.

Значение $\eta_т$ обычно составляет 10—20% и имеет бо́льшие значения для металлов с низкой теплопроводностью и жестких режимов сварки. В последнем случае $\eta_т$ может достигать 70—80%.

Величину $Q_{ээ}$ рассчитывают по приближенным формулам для условного теплового состояния металла. По $Q_{ээ}$ можно ориентировочно оценить действующее значение тока [8]:

$$I_д=\sqrt{\frac{Q_{ээ}}{0{,}24k_R R_{д.кон}t_{св}}},$$

где $R_{д.\,кон}$ — сопротивление деталей к концу процесса нагрева; k_R — коэффициент, учитывающий изменение сопротивления в процессе сварки.

Значение сварочного тока, так же как и других параметров режима (сварочного и ковочного усилия, времени сварки и приложения ковочного усилия), можно определить расчетно-экспериментальным методом, используя представления теории подобия нагрева и пластической деформации [7, 8].

Точечная и шовная сварка сопровождается активным проявлением дилатометрического эффекта (см. рис. 2). Относительно свободное перемещение металла происходит в направлении оси электродов, а увеличение объема по оси r сдерживается холодной массой металла. Наличие значительных градиентов температур вызывает дополнительные сжимающие усилия во внутренних слоях металла и ядре. При искусственном ограничении перемещения (заклинивании) электродов за счет внутренних сил наблюдается значительное увеличение усилия (на 500—600 кгс).

Внутренние силы, возникающие при нагреве и плавлении, стремятся раздвинуть электроды на величину Δ_T. Обычно подвижен верхний электрод машины и для его перемещения необходимо преодолеть лишь силы трения и инерции в приводе усилия. Фактически электрод перемещается на величину $\Delta_и < \Delta_T$, так как одновременно с расширением металла происходит пластическая деформация и образование вмятины $\Delta_д$ (рис. 22). Заметное перемещение наблюдается обычно лишь с момента образования ядра. Наибольшее значение $\Delta_и$ определяется размерами ядра. Например, оптимальному для данной толщины объему зоны расплавления соответствует $\Delta_и = 7 \div 10\%\delta$. На измерении перемещения основан ряд систем контроля и автоматического регулирования процесса сварки.

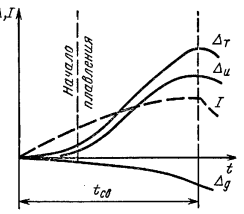


Рис. 22. Изменение значений I, $\Delta_т$, $\Delta_и$ и $\Delta_д$ (глубины вмятины) при точечной сварке

Кристаллизация происходит с очень большой скоростью, достигающей 250 см/мин. Для большинства металлов (стали, никелевых и титановых сплавов) характерна дендритная структура металла ядра. Оси дендритов, образовавшихся на базе полуоплавленных зерен, параллельны оси электродов, т. е. направление роста дендритов совпадает с направлением наибольшего теплоотвода. Для ряда легких сплавов с широким интервалом кристаллизации, например АМг6, Д16 (интервал кристаллизации соответственно 70 и 130°С) кроме участка дендритной структуры отмечается наличие в центре ядра протяженной зоны равноосных кристаллов, что объясняется большой склонностью этих сплавов к концентрационному переохлаждению. Вследствие интенсивного отвода тепла в электроды изменение параметров режима оказывает небольшое влияние на характер кристаллизации. Например, сварка на жестких режимах несколько увеличивает протяженность зоны равноосных кристаллов.

Химический состав металла ядра отличается значительной неравномерностью. По длине кристалла (от основания к вершине) содержание легирующих элементов увеличивается, а между отдельными кристаллами наблюдается скопление эвтектик и интерметаллидов, вызванное развитием междендритной ликвации. В центре ядра проявляется зональная ликвация, например, металл в этой зоне при сварке сплава Д16 обогащен медью.

Большие скорости охлаждения приводят к возникновению метастабильной литой структуры, например мартенсита в стали, отличающегося низкой пластичностью.

УДАЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПЛЕНОК

При стыковой сварке торцы деталей «открыты» для взаимодействия с атмосферой. Наиболее активно окисление развивается при сварке сопротивлением. Для сварки оплавлением характерно непрерывное обновление металла на торцах, образование большого количества капель и паров металла в зазоре при взрыве

перемычек, связывающих кислород и другие газы, что значительно снижает интенсивность взаимодействия металла с атмосферой. Однако при соединении химически активных металлов (титана, молибдена и др.) такая защита может оказаться неэффективной, и сварку рекомендуется проводить в инертной среде. При точечной и шовной сварке соединяемые поверхности «скрыты» от атмосферы, но на них могут сохраняться окислы и другие тугоплавкие пленки.

Поверхностные пленки препятствуют образованию металлических связей и должны быть удалены из зоны соединения. Удаление окислов может происходить в результате раздробления и вытеснения их при осадке и деформировании или под действием электродинамических сил в жидком металле.

При стыковой сварке сопротивлением вследствие сравнительно малой степени пластической деформации, локализующейся в приконтактных слоях металла, происходит лишь частичное разрушение и удаление окислов. Степень обновления поверхности составляет при этом не более 60—70%, что определяет относительно низкую прочность и пластичность соединений.

При сварке оплавлением удаление окислов значительно облегчается и происходит как вместе с частицами расплавленного металла, выбрасываемого из стыка, так глазным образом и в результате деформаций при осадке и вытеснения окислов с жидким и твердым металлом в грат. При сравнительно небольшой деформации степень обновления поверхности при этом достигает 100%. Прочность и пластичность таких соединений мало уступают основному металлу. Условия разрушения и удаления окислов при стыковой сварке зависят от температуры торцов, их фазового состояния (табл. 1), свойств окислов и металла.

Условия удаления окисных пленок

Состояние металла (пример)	Состояние окислов	Твердость металла и окислов (H_{Me} и H_{MeO})	Удаление пленок	Способ сварки
Твердый (Fe)	Твердые (Fe_2O_3)	$H_{Me} \approx H_{MeO}$	Затруднительное	Сопротивлением
Твердый (Al)	Твердые (Al_2O_3)	$H_{Me} < H_{MeO}$	Облегченное	
Твердый (Fe)	Жидкие (FeO)	$H_{Me} > H_{MeO}$	Легкое	
Жидкий (Fe)	Твердые (Cr_2O_3)	$H_{Me} < H_{MeO}$		Оплавлением
Жидкий (Fe)	Жидкие (FeO)	$H_{Me} \approx H_{MeO}$		

При точечной (рельефной) и шовной сварке механизм предварительного разрушения окисных пленок при образовании электрического контакта (I этап) аналогичен сварке сопротивлением. Полное разрушение и удаление поверхностных пленок, как правило, более тугоплавких, чем основной металл, происходит в жидком металле за счет электродинамических сил. Действие этих сил приводит к интенсивному перемешиванию расплавленного металла, следы которого часто обнаруживаются на ранней стадии образования соединения [4]. В результате взаимодействия тока с собственным магнитным потоком при постоянной плотности тока j_0 на расстоянии r от оси Z в объеме dV действует элементарная сила dF_j (рис. 23). Наибольшее значение сил dF_j — на периферии ядра; в центре они снижаются до нуля. Под действием этих сил в жидком ядре давление распределяется по параболическому закону

$$p = \frac{\mu_a j_0^2 (R^2 - r^2)}{4},$$

где μ_a — абсолютная магнитная проницаемость. Обычно ядро представляется в виде эллипсоида и поэтому давление в центре его максимально (до 150 кгс/см²

при точечной сварке АМг6). На границах ядра в направлениях по осям Z и r давление близко к нулю. Подобное распределение давления вызывает циркуляцию жидкости от центра к периферии.

Частицы пленок, образовавшиеся в результате механического разрушения на I этапе, увлекаются потоком металла и замешиваются в ядре. Состав металла ядра таким образом выравнивается.

Находящаяся в жидком металле частица испытывает элементарную силу от градиента давления, вызывающую перемещение частиц от центра к периферии ядра:

$$dF_p = \Delta p_ч \, dV_ч,$$

где $\Delta p_ч$ — градиент давления на частице объемом $dV_ч$, вызванный разницей давлений в сечениях I и II. Частицы, присутствующие в ядре, — пленки окислов и плакировки, металлические блоки отличаются по электропроводности от основного металла. Поэтому плотность тока в частице ($j_ч$) и в жидком металле (j_0) может быть различна. При этом частицы испытывают действие дополнительных сил dF_j. Так, если $j_ч < j_0$ (частица менее электропроводна, чем металл ядра), то на эту частицу действует дополнительная сила, стремящаяся переместить ее к периферии ядра. При условии $j_ч > j_0$ сила dF_j может оказаться больше силы dF_p и частица переместится в центр ядра. Обычно же нерастворимые частицы пленки обладают относительно малой электропроводностью и к началу третьего этапа оказываются на периферии ядра, не препятствуя образованию общей ванны расплавленного металла и формированию металлической связи.

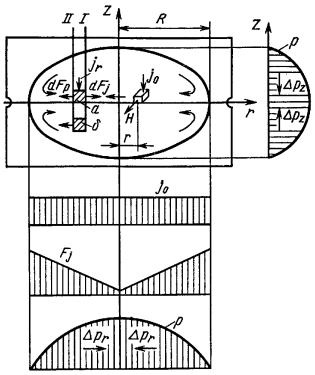


Рис. 23. Силы, действующие на металл ядра и находящиеся в нем частицы

ПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ МЕТАЛЛА ПРИ СВАРКЕ

Пластическая деформация происходит на протяжении всего процесса образования соединений, начиная от создания электрического контакта до проковки или осадки деталей. Особенно велика роль этого процесса при стыковой сварке, когда энергия пластической деформации имеет большое значение в образовании металлической связи. Деформация металла происходит в основном под действием внешнего усилия, создаваемого приводом машины.

Степень пластического течения и необходимое усилие определяются сопротивлением пластической деформации металла ($\sigma_д^*$), которое зависит от схемы напряженного состояния, механических свойств материала и температуры. Большая часть объема металла находится в состоянии, близком к неравномерному сжатию (рис. 24). В контактах деталь — деталь (электрод — деталь) наибольшее сжимающее напряжение отмечается вблизи оси симметрии (σ_Z). Касательные напряжения τ_r, действующие вдоль контакта, наоборот, имеют минимальное значение вблизи этой оси и возрастают в направлении оси r. Направление течения металла (стрелки на рис. 24) определяется сопротивлением его пластической деформации в различных зонах соединения. Так, при точечной сварке металл преимущественно деформируется в зазор между деталями, при шовной — в зазор впереди

ролика и на поверхности деталей позади него. Для стыковой сварки характерно интенсивное течение металла на периферийных участках стыка.

При стыковой сварке сопротивлением пластическая деформация необходима для создания электрического контакта ($\Delta_к$) и удаления окислов из стыка (Δ_0).

Величина $\Delta_к$ относительно невелика и достигается для сварки стержней из низкоуглеродистой стали при давлениях 2 — 4 кгс/мм².

Значение Δ_0 весьма значительно и при сварке стержней диаметром 20 мм из низкоуглеродистой стали составляет (10—15 мм). В общем случае образование физического контакта в результате удаления поверхностных пленок и выравнивания рельефа достигается в основном за счет пластического течения металла вдоль стыка под действием τ_r. Однако вследствие относительно малой температуры в контакте и затрудненных условий деформации площадь физического контакта

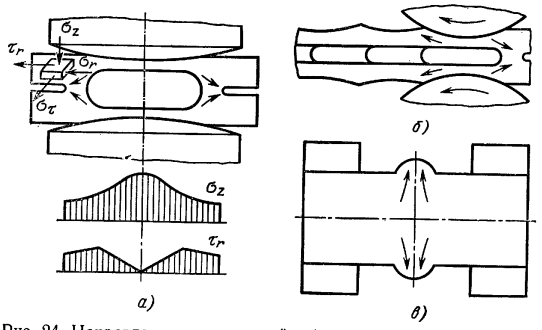


Рис. 24. Направления пластической деформации и эпюры σ_z и τ, при точечной (*а*), шовной (*б*) и стыковой (*в*) сварке

деталей по отношению к площади сечения стыка после сварки $S_{кон}$ сравнительно невелика (50—70%), несмотря на значительную степень деформации металла при осадке, которая характеризуется коэффициентом $k_п > 4\left(k_п = \frac{S_{кон}}{S_0}\right)$. В этих условиях определенная часть окислов остается в стыке. Применение же чрезмерно больших усилий осадки может привести к потере устойчивости деталей и снижению пластичности соединений, связанному с интенсивной деформацией и искривлением волокон [4, 8].

При стыковой сварке оплавлением величина $\Delta_к$ весьма мала. Деформация при осадке необходима для выравнивания рельефа (деформации кратеров) и существенно меньше, чем при сварке сопротивлением ($k_п < 2$). Относительная площадь физического контакта близка к 100%. При осадке стержней из низкоуглеродистой стали давление осадки $p_{ос} = 6 \div 8$ кгс/мм², $\Delta_к = 4 \div 5$ мм (диаметр стержней 20 мм). Величина $\Delta_{ос}$ тесно связана с $p_{ос}$ и $v_{ос}$. Она возрастает с увеличением глубины кратеров и степени окисления торцов при оплавлении. Рост $\Delta_{ос}$ обычно сопровождается увеличением $\sigma^*_д$ и $p_{ос}$. Для снижения величины и давления осадки повышают $v_{ос}$ или производят осадку под током (на 20—30% от $\Delta_{ос}$), что облегчает деформацию. Помимо этого, рекомендуется использовать оплавление на повышенных скоростях, особенно непосредственно перед осадкой, с целью выравнивания рельефа и температур на торцах деталей.

При точечной и шовной сварке роль пластической деформации ограничена созданием электрического контакта, уплотняющего ядро пояска, и проковкой соединения при охлаждении. Высокое значение относительной площади физического контакта (до 100%) достигается в результате плавления металла и удаления пленок под действием электродинамических сил. Общая степень пластической деформации, определяемая глубиной вмятины ($\Delta_{вм}$), составляет обычно $\sim$ 10—20% от толщины детали и в соответствии с указанными выше этапами состоит из следующих составляющих: $\Delta_{вм} = \Delta_к + \Delta_у + \Delta_{пр}$, где $\Delta_к$, $\Delta_у$ и $\Delta_{пр}$ — степень деформации, необходимая соответственно для формирования электрического контакта на I этапе, уплотняющего пояса на II этапе и проковки (уплотнения) ядра на III этапе.

Наиболее активно развивается пластическая деформация на II этапе. По мере нагрева металла током его сопротивление деформации уменьшается. Значения $\sigma^*_{д.\,кон}$ для различных легких сплавов приведены в табл. 2.

2. Значение $\sigma^*_{д.\,кон}$ при точечной сварке различных металлов ($t_{св} = 0{,}1$ с; $F_{св} = 500$ кгс; $d_я = 6$ мм)

Металл	АМц	МА2-1	Д16АТ	АМг6	
				плакированный	неплакированный
$\sigma^*_{д.\,кон}$, кгс/мм²	5	6	8,5	12	15

Металл интенсивно течет в увеличивающиеся при тепловом расширении зазоры. Рост этих зазоров оказывает благоприятное влияние на сохранение высокой плотности тока в зоне сварки за счет образования своеобразного рельефа и ограничения площади контактов. Образующийся в результате направленной пластической деформации уплотняющий поясок удерживает жидкий металл в ядре от выплеска. Величина $\Delta_у$ повышается с ростом усилия и времени сварки. Поэтому для обеспечения необходимой деформации металла при сварке теплопрочных металлов целесообразно использовать мягкие режимы при значительных усилиях. В пределах одной группы материалов переход на жесткие режимы сопровождается повышением усилия. Наличие мягких прослоек в контакте, например цинка на поверхности деталей, значительно облегчает деформацию металла.

Шовная сварка по сравнению с точечной, особенно при малых скоростях, отличается повышенным теплосодержанием металла и малыми значениями $\sigma^*_д$. Поэтому шовную сварку можно производить при относительно небольших усилиях на жестких режимах.

Значение $\Delta_{пр}$ ограничено по отношению к $\Delta_у$, так как при проковке металл охлаждается, а напряжения значительно меньше, чем к началу II этапа, вследствие увеличения площади контакта. Степень деформации на этом этапе может быть повышена проковкой под током за счет дополнительного импульса или модуляции (плавного спада) тока.

Для ориентировочных расчетов сварочного усилия к концу II этапа при точечной сварке и усилия осадки при стыковой сварке оплавлением можно использовать соотношение

$$F = \sigma^*_{д.кон} S_{кон},$$

где $S_{кон}$ — площадь сечения деталей при сварке оплавлением; $S_{кон} = \frac{\pi d^2_{к.кон}}{4}$ при $t = t_{св}$ при точечной сварке.

Величину $d_{к.\,кон}$ можно связать с $d_{я.\,ном}$: $d_{к.\,кон} = k_к d_{я.\,ном}$. При этом для легких сплавов $k_к = 1{,}2 \div 1{,}4$, для низкоуглеродистой и жаропрочной стали и сплавов соответственно 1,1—1,3 и 1,05—1,1. При определении $F_{ос}$ принимают, что $\sigma^*_{д.\,кон} = k_д \sigma_S$ (σ_S — предел текучести при средней температуре T зоны деформации; $k_д = 1{,}2 \div 1{,}3$).

ДЕФЕКТЫ СВАРКИ И ПРИЧИНЫ ИХ ОБРАЗОВАНИЯ

Получение соединений с оптимальными свойствами определяют соответствующими условиями протекания основных процессов. Для этого расчетным или экспериментальным путем устанавливают необходимую программу нагрева и давления. Отклонение от нее вследствие действия различного рода возмущений, связанных как с работой оборудования, так и с технологическими факторами, вызывает нарушение условий протекания основных и неблагоприятное развитие сопутствующих процессов (возникновение значительных остаточных напряжений, диффузии металлов в контакте электрод — деталь, взаимодействие металлов с атмосферой,

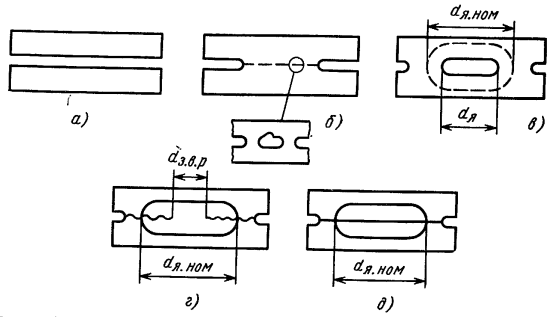


Рис. 25. Виды непроваров при точечной сварке:

а — полное отсутствие соединения; *б* — непровар в виде «склейки»; *в* — малые размеры ядра ($d_я < d_{я.\,ном}$); *г* — недостаточный диаметр зоны взаимного расплавления ($d_{з.\,в.\,р}$); *д* — полное отсутствие взаимного расплавления

резкое изменение свойств металла шва и околошовной зоны и др.), что может привести к образованию дефектов.

Наиболее опасным дефектом является непровар (рис. 25), который характеризуется отсутствием или малыми размерами области металлической связи. Наряду с этим устанавливаются в зависимости от метода сварки и свойств свариваемых материалов количественные показатели (прочность, пластичность соединения), отклонения от которых расцениваются как непровар. Для стыковой сварки характерен тип непровара, связанный с отсутствием металлической связи между отдельными участками и сохранением окисной пленки в стыке. Подобные соединения отличаются пониженной пластичностью. Аналогичный дефект — «склейка» наблюдается при точечной и шовной сварке. В этом случае литая зона отсутствует, и соединение деталей происходит в твердой фазе по ограниченной площади. Прочность таких соединений на срез вполне удовлетворительна, но они быстро разрушаются при действии отрывающих и знакопеременных нагрузок.

К другим видам непровара следует отнести уменьшение размеров ядра (рис. 25, *в*) ниже установленных номинальных значений, а также своеобразный

вид непровара, связанный с уменьшением или полным отсутствием общего ядра. Обычно этот дефект наблюдается при наличии на поверхности жаропрочных металлов окисной пленки или толстого слоя плакировки на поверхности алюминиевых сплавов (рис. 25, *г*, *д*). Ограниченная площадь зоны взаимного расплавления уменьшает прочность точки. Общие рекомендации по предупреждению этих дефектов предусматривают соблюдение постоянства параметров режима (величины тока и усилий, скорости оплавления), состояния поверхностей деталей и электродов, качества сборки и т. д.

В ы п л е с к и (рис. 26) — весьма распространенный дефект точечной и шовной сварки. Он проявляется в выбросе части металла из зоны соединения. Выплески обычно разделяют на наружные (из зоны контакта электрод — деталь), внутренние (между деталями), начальные (на I этапе) и конечные (к концу II этапа).

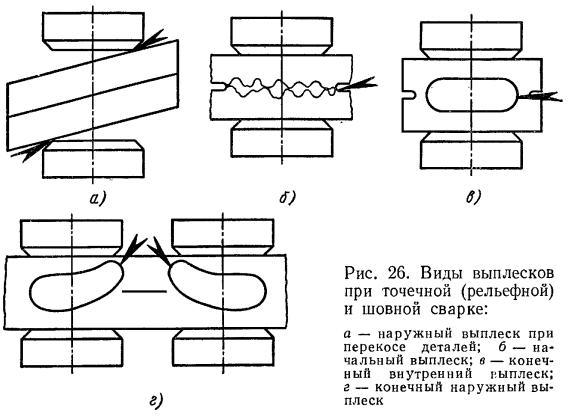


Рис. 26. Виды выплесков при точечной (рельефной) и шовной сварке:

а — наружный выплеск при перекосе деталей; *б* — начальный выплеск; *в* — конечный внутренний выплеск; *г* — конечный наружный выплеск

Причиной появления этого дефекта является отставание скорости деформации от скорости нагрева. Возникновение выплеска связано с ограниченностью электрического контакта при снижении усилия, перекосе электродов, неудовлетворительном состоянии поверхностей, что приводит к увеличению плотности тока и температуры (скорости ее нарастания) в контакте. Наружный выплеск снижает стойкость электродов и ухудшает внешний вид изделий. Образование конечного выплеска объясняется локальным раскрытием зазора между деталями при тепловом расширении металла, при относительно высоком значении $\sigma^*_д$, снижении усилия и малом времени сварки, плохой подготовке поверхности и т. д. Скорость деформации может оказаться недостаточной для заполнения зазора, и возникает выплеск. Для характеристики чувствительности сплава и режима сварки к конечным выплескам используется понятие о критическом (максимальном) диаметре ядра, который можно получить без выплеска (рис. 27). Этот диаметр мало зависит от толщины деталей. Конечный выплеск, как и начальный, приводит к засорению магистралей и емкостей. При этом в ядре часто образуются трещины и рыхлоты.

Для предотвращения выплесков необходимо повысить скорость и степень деформации. Это достигается также при использовании мягких режимов, повышении $F_{св}$ (предварительном обжатии), плавном нарастании тока, применении пред-

варительного подогрева током, введении пластичных прокладок в зону контактов и т. п. Рост зазоров может быть ограничен дополнительным механическим обжатием периферии ядра специальными электродами. Режим сварки стараются выбрать таким, чтобы при возможных изменениях параметров диаметр ядра был

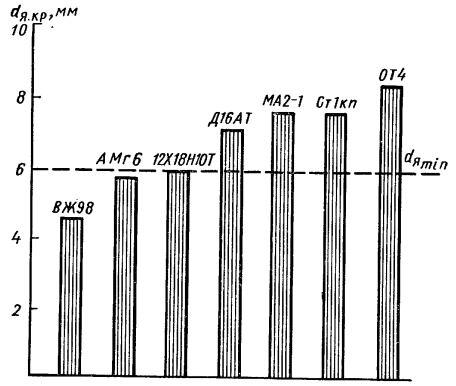


Рис. 27. Критический диаметр ядра при точечной сварке различных металлов ($t_{св}$ = 0,1 с; $F_{св}$ = 500 кгс; δ = 1,5 + 1,5 мм)

меньше критического. При $d_{я.\,кр} \geqslant (1{,}2 \div 1{,}3)d_{я.\,ном}$ конечный выплеск, как правило, не наблюдается.

Трещины, рыхлоты и усадочные раковины характерны в основном для точечной и шовной сварки. Трещины образуются в температурном интервале хрупкости (ТИХ) под действием растягивающих напряжений, возникающих при охлаждении и кристаллизации металла (рис. 28). Наибольшей чувствительностью к трещинам обладают сплавы с широким ТИХ, например АМг6, Д16, углеродистая сталь. Чаще всего эти дефекты возникают в ядре и распространяются от центра ядра к поверхности деталей. Трещины образуются обычно при сварке на малых усилиях деталей большой толщины (> 2 мм), когда объем ядра значителен, при внутреннем выплеске и связанном с ним «зависании» электрода и снижении давления на кристаллизующийся металл. В ядре иногда наблюдаются рыхлоты и раковины, в основном усадочного происхождения.

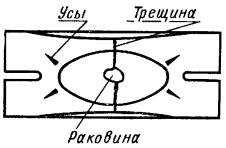


Рис. 28. Характер расположения трещин и усов в зоне соединения

Трещины («усы») в околошовной зоне, характерные для сплавов с широким интервалом кристаллизации и сварки на мягких режимах, обычно располагаются в области уплотняющего пояска под некоторым углом (часто 45°) к поверхности деталей [8]. При шовной сварке вблизи контакта ролик — деталь появляются трещины, параллельные поверхности деталей. Основные меры борьбы с указан-

ными дефектами заключаются в создании благоприятного напряженного состояния в ядре, характеризующегося наличием сжимающих напряжений ($\sigma_{сж}$), до окончания кристаллизации. Это достигается непрерывным или ступенчатым повышением усилия (в 2—3 раза) сразу после выключения тока, когда металл находится в ТИХ (рис. 29).

Уменьшение скорости и величины проковки достигается при подогреве металла дополнительным импульсом тока.

При стыковой сварке трещины проявляются в виде расслоений металла, вызванных сильным искривлением волокон при осадке. Кроме того, в стыке могут наблюдаться рыхлоты при неполном удалении из зоны соединения жидкого металла. Предотвращение дефектов при стыковой сварке достигается улучшением рельефа оплавленной поверхности, увеличением скорости осадки и другими средствами, которые приводят к наиболее полному удалению жидкого металла при минимально возможной степени деформации околошовной зоны.

Изменение структуры и свойств сварного соединения может привести к снижению пластичности при соединении закаливающейся стали, увеличению зерна в околошовной зоне при длительном оплавлении, окислению металла при ухудшении условий защиты и т. д. [4, 8].

При стыковой сварке стали в зоне стыка наблюдается обезуглероживание металла, которое связано с выгоранием углерода и выдавливанием металла, находящегося в жидком или твердо-жидком состоянии.

Процессы массопереноса в значительной мере могут изменять свойства и состав металла в контакте электрод — деталь. Особую чувствительность к этим процессам обнаруживают сплавы с высокой теплопроводностью (алюминиевые и магниевые сплавы), а также металлы с легкоплавкими покрытиями — сталь с покрытиями цинка, свинца, кадмия и т. д. Наличие продуктов взаимодействия на поверхности деталей ухудшает их коррозионную стойкость, а повышенное выделение теплоты в контактах снижает стойкость электродов. Скорость накопления продуктов взаимодействия определяет при сварке указанных металлов момент зачистки (заточки) электродов (роликов). Так, при точечной сварке магниевых сплавов стойкость электрода определяется обычно 10—20 точками (или одним оборотом ролика), алюминиевых сплавов — 70—100 точками, оцинкованной стали — 500—1000 точек, низкоуглеродистой стали — 8,0—10 тыс. точек.

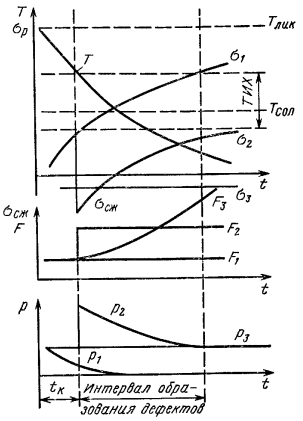


Рис. 29. Схема напряженного состояния охлаждающегося металла при постоянном усилии F_1 (напряжения σ_1 и давление в расплавленном металле p_1), при ступенчатом приложении во время $t_к$ ковочного усилия F_2 (σ_2 и p_2) и плавном увеличении усилия F_3 (σ_3 и p_3); $\sigma_р$, $\sigma_{сж}$ — соответственно растягивающие и сжимающие напряжения

ОСНОВЫ ВЫБОРА РЕЖИМОВ СВАРКИ

В процессе сварки металл подвергается своеобразному термомеханическому воздействию (ТМВ), которое может привести к существенному изменению химического состава, структуры и свойств (прочности, пластичности и т. д.) исходного материала. Чувствительность металла к этим неблагоприятным изменениям определяется

понятием свариваемости. Свариваемость в ряде случаев можно оценить и количественно, например сравнением некоторых свойств сварных соединений и исходного металла.

Для каждого конкретного металла можно найти некоторый оптимальный режим — наиболее благоприятную программу нагрева и напряженного состояния, которая обеспечила бы получение соединений заданных размеров и наилучшую свариваемость. Рекомендуемые минимальные размеры соединений (граница непровара), выполненных точечной и шовной сваркой, приведены в табл. 3. Номинальные размеры соединений, устанавливаемые при выборе режима, должны быть на 15—20% больше минимальных с учетом колебаний значений параметров режима и технологических факторов.

3. Размеры соединений при точечной и шовной сварке, мм

Толщина тонкой детали	Диаметр литого ядра	Ширина шва	Минимальная нахлестка при однорядном шве		Минимальный технологический шаг точек		
Минимальные значения			Легкие сплавы*1	Сталь, титановые сплавы	Легкие сплавы	Низколегированная сталь	Коррозионно-стойкая, жаропрочная сталь и сплавы
0,3	2,5	2,0	8,0	6	8	7	5
0,5	3,0	2,5	10,0	8	11	10	7
1,0	4,0	3,5	12—14	12	14	12	10
1,5	6,0	5,5	16—18	14	20	14	12
2,0	7,0	6,5	18—20	16	25	18	14
3,0	9,0	8,0	24—26	20	35	24	18
4,0	11	10,0	28—30	26	45	32	24
5,0	13	12,0	34—36	34	55	40	30
6,0	15	14,0	38—43	44	65	52	40

*1 Большие значения — для точечной сварки, меньшие — для шовной.

Величину проплавления в этом случае определяют для каждой из деталей отдельно. Она должна находиться в пределах 30—80% δ. При сварке деталей разной толщины минимальное проплавление тонкой детали должно быть не менее 20% δ.

При рельефной сварке могут быть использованы как одиночные рельефы, так и рельефы замкнутой формы для получения плотных соединений. Наиболее распространены круглые рельефы, при этом диаметр основания рельефа составляет ориентировочно $2\delta + 0{,}75$ мм, а его высота $0{,}4\delta + 0{,}25$ мм [3].

При стыковой сварке для равномерного нагрева и деформации обеих заготовок форма и сечение их должны быть приблизительно одинаковы, а разность в диаметрах не превышает 15% и в толщине 10% [6,8]. В общем случае для определения оптимальной программы необходимо учитывать следующие факторы (табл. 4): особенности способа сварки; физико-химические и механические свойства сплава; чувствительность металла к ТМВ; свойства поверхностных пленок.

Специфика контактной сварки заключается в следующем:

химический состав зоны соединения не изменяется (точечная и шовная сварка) или изменяется незначительно (стыковая сварка);

высокое давление, действующее на металл, практически исключает образование пористости;

возможность в широких пределах управлять давлением позволяет создавать благоприятное напряженное состояние и избегать образования трещин;

4. Физико-химические и механические свойства конструкционных материалов

Группа материалов	ρ_0, мкОм·см	$\alpha_t \cdot 10^{-6}$, 1/°С	λ, $\frac{кал}{см \cdot с \cdot °С}$	c_v, $\frac{кал}{см^3 \cdot °С}$	Ширина интервала кристаллизации, °С	Чувствительность к ТМВ*1	Плотность окисной пленки*1	$\sigma_т$, $\frac{кгс/мм^2}{T, °С}$	ψ, % $\frac{}{T, °С}$
Низкоуглеродистая сталь	13	11,5	0,15		20	М	М	$\frac{7}{600}$	$\frac{90}{600}$
Низколегированная и среднелегированная сталь	22	12	0,1	0,85	До 150	Б		$\frac{50}{550}$	$\frac{80}{550}$
Коррозионно-стойкие и жаропрочные стали и сплавы	70—120	14	0,03		60	М	Б	До $\frac{25}{900}$	$\frac{50}{600}$
Титановые сплавы	100—150	9	0,02	0,5	50			До $\frac{15}{600}$	$\frac{80}{600}$
Алюминиевые и магниевые сплавы	4—15	22	0,3	0,5	До 130	С	С	$\frac{2,5}{400}$	$\frac{100}{400}$
Медные сплавы	5—15	20	0,2	0,8	20	М		$\frac{5}{600}$	$\frac{50}{600}$

*1 Б — большая, С — средняя, М — малая.

значительная степень деформации облегчает разрушение и удаление окисных пленок;

контактной сваркой легко соединяются лишь однородные металлы или сплавы на одной основе.

Величина удельного электросопротивления ρ_0 при комнатной температуре в значительной мере определяет необходимую силу сварочного тока. Коэффициенты тепло- и температуропроводности оказывают влияние на ширину зоны термического влияния, вероятность кристаллизации металла в процессе оплавления, температуру в контакте электрод — деталь и т. п. Степень теплопередачи снижается на жестких режимах сварки.

С увеличением коэффициентов линейного расширения и температуропроводности повышается склонность металла к короблению. Степень коробления снижается при сварке с ковочным усилием.

Предел текучести и другие показатели пластичности, например сужение $\psi_т$, определяют развитие пластической деформации и тем самым склонность к выплеску, полноту удаления окисных пленок и вероятность непроваров при стыковой сварке. Степень пластической деформации повышается с ростом усилия и длительности нагрева.

Чувствительность к термомеханическому циклу определяется составом сплава и типом диаграммы состояния.

Термомеханическое воздействие на металл может быть в значительной мере снижено за счет рационального построения режимов по току и усилию с применением последующей термообработки в машине, использованием защитных сред и т. п.

Высокая температура плавления и плотность пленок затрудняют их удаление при формировании электрического и физического контактов, особенно когда металл находится в твердом состоянии. Наличие влаги в гидроокисных пленках, продуктах коррозии приводит к дополнительному окислению металла, вызывая образование непроваров и повышенный износ электродов. Влияние пленок на процесс сварки может быть уменьшено путем увеличения деформации металла, тщательной подготовки поверхностей деталей перед сваркой, нагревом в инертной или восстановительной атмосферах. Особенности контактной сварки позволяют определить принципы построения режимов соединения различных конструкционных материалов.

Низкоуглеродистая сталь хорошо сваривается при относительно небольших токах и усилиях. Она отличается малой чувствительностью к ТМВ, узким интервалом кристаллизации и поэтому может свариваться точечной сваркой при постоянном усилии одним импульсом тока малой длительности.

В промышленности используют низкоуглеродистую сталь с различными покрытиями, улучшающими в основном коррозионную стойкость металла (например, оцинкованную, освинцованную, алитированную и хромированную сталь, а также сталь с фосфатными покрытиями). Мягкие покрытия снижают сопротивление деформации металла, что вызывает необходимость повышения сварочного тока (на 20—50%) по сравнению с точечной сваркой обычной стали. Основная трудность сварки материалов с такими покрытиями заключается в активном взаимодействии электродного и свариваемого металлов, что приводит к снижению коррозионной стойкости соединений и быстрому износу электродов, особенно при сварке оцинкованной и освинцованной стали. Свариваемость улучшается при сварке на жестких режимах, уменьшении толщины покрытий, интенсивном охлаждении электродов (например, жидкими газами) и т. п. Удовлетворительные результаты достигаются и при рельефной сварке. Сварка фосфатированной стали возможна, если толщина покрытия не превышает 5—7 мкм. Для разрушения пленки в контактах рекомендуется использовать электроды со сферической рабочей поверхностью [3].

Стыковая сварка низкоуглеродистой стали производится на воздухе, а окислы легко удаляются из стыка при сравнительно невысоких давлениях и скоростях осадки. Соединения обладают достаточной прочностью и пластичностью и не требуют последующей термообработки.

Низколегированная и углеродистая сталь характеризуется высоким сопротивлением пластической деформации, значительным интервалом кристаллизации и склонностью к закалке, что вызывает существенное снижение пластичности металла и образование трещин. Сила тока, как и в предыдущем случае, относительно невелика.

Сварочные усилия и усилия осадки в 1,5—2 раза больше, чем при соединении металлов предыдущей группы. При этом заметно повышаются скорость оплавления и осадки деталей. Для предупреждения трещин в ядре рекомендуется ковочное усилие при толщине деталей $> 1{,}5$ мм. Снижение сопротивления деформации и склонности к образованию трещин достигается при относительно медленном нагреве и охлаждении зоны соединения. С этой целью при точечной и шовной сварке используются мягкие режимы сварки, модуляция тока или многоимпульсный режим (например, два или три импульса), а при стыковой сварке — предварительный подогрев и последующая термообработка как в самой машине, так и с помощью других нагревательных устройств.

Коррозионные и жаропрочные стали и сплавы отличаются высоким электрическим сопротивлением и малой теплопроводностью. Поэтому силы токов значительно меньше (в 1,5—2 раза), чем при соединении сталей, а ширина зоны термического влияния относительно невелика. Повышенное сопротивление деформации этих металлов при высоких температурах вызывает необходимость применения больших усилий и мягких режимов сварки. Возможность образования тугоплавких окислов снижается при повышенных скоростях оплавления и осадки.

Титановые сплавы — относительно пластичные металлы с низкой электро- и теплопроводностью, весьма активные по отношению к газам, содержащимся в атмосфере. По аналогии с металлами предыдущей группы сила сварочного тока невелика, а величины усилий и длительность нагрева приблизительно такие же, как при сварке низкоуглеродистых сталей. Достаточно надежная защита при стыковой сварке достигается интенсивным оплавлением. В ряде случаев используют сварку в инертных средах. Термически упрочняемые сплавы, воспринимающие закалку, иногда требуют последующей термообработки.

Алюминиевые и магниевые сплавы характерны высокой теплопроводностью, малым электрическим сопротивлением и наличием на поверхности тугоплавкой окисной пленки. Точечная и шовная сварка производится на жестких режимах при больших силах тока. Легированные алюминиевые и магниевые сплавы отличаются широким интервалом кристаллизации, что требует использования ковочного усилия, начиная с толщин 1,5—2 мм. Поверхности деталей тщательно обрабатывают для удаления толстых окисных пленок в целях предотвращения конечного выплеска. Иногда, например при сварке сплава АМг6 толщиной свыше 2,5—3 мм, с поверхности удаляется слой плакировки для исключения непроваров. Указанные металлы, особенно магниевые сплавы, весьма чувствительны к массопереносу в контакте электрод — деталь, что вызывает необходимость частой зачистки поверхности электродов и роликов.

Алюминиевые сплавы соединяют и стыковой сваркой оплавлением. Процесс проводится при больших скоростях оплавления и осадки (до 150 мм/с). Усилия осадки в 3—4 раза больше, чем при сварке низкоуглеродистой стали [5, 8].

Медные сплавы. Точечную и шовную сварку производят при больших силах тока и малом времени его протекания, что позволяет уменьшить интенсивность массопереноса в контакте и износ электродов. Особые трудности возникают при сварке чистой меди. В этом случае рекомендуется наряду с жесткими режимами использовать электроды из вольфрама или кирита [8]. Стыковую сварку этих металлов производят при больших скоростях оплавления и осадки, что также благоприятно сказывается на уменьшении испарения цинка в латуни.

Тугоплавкие металлы (ниобий, тантал, цирконий и их сплавы) удовлетворительно соединяются точечной сваркой. При сварке молибдена и воль-

фрама, отличающихся высокой теплопроводностью, температуры в контакте электрод — деталь превышают $T_{пл}$ меди. Предложен ряд оригинальных технологических приемов, снижающих температуру на поверхности деталей [8], но, очевидно, в промышленном масштабе проблема точечной и шовной сварки этих металлов пока не решена. Однако молибден и вольфрам можно соединять стыковой сваркой [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Балковец Д. С., Орлов Б. Д., Чулошников П. Л.** Точечная и роликовая сварка специальных сталей и сплавов. М., Оборонгиз, 1957, 430 с.
2. **Гельман А. С.** Основы сварки давлением. М., «Машиностроение», 1970, 312 с.
3. **Гуляев А. И.** Технология точечной и рельефной сварки сталей. М., «Машиностроение», 1969, 239 с.
4. **Зайчик Л. В., Орлов Б. Д., Чулошников П. Л.** Контактная электросварка легких сплавов. М., Машгиз, 1963, 219 с.
5. **Кабанов Н. С., Слепак Э. С.** Технология стыковой контактной сварки. М., «Машиностроение», 1970, 264 с.
6. **Кучук-Яценко С. И., Лебедев В. К.** Контактная стыковая сварка непрерывным оплавлением. Киев, «Наукова думка», 1965, 139 с.
7. **Патон Б. Е., Лебедев В. К.** Электрооборудование для контактной сварки. М., «Машиностроение», 1969, 440 с.
8. **Технология** и оборудование контактной сварки. М., «Машиностроение», 1975, 535 с. Авт.: Б. Д. Орлов, Ю. В. Дмитриев, А. А. Чакалев и др.
9. **Чулошников П. Л.** Точечная и роликовая электросварка легированных сталей и сплавов. М., «Машиностроение», 1974, 232 с.
10. **Шавырин В. Н., Андреев Н. Х.** Клеемеханические соединения в технике. М., «Машиностроение», 1968, 300 с.

Глава 8
РЕЗКА МЕТАЛЛОВ

ГАЗОПЛАМЕННАЯ СВАРКА И КИСЛОРОДНАЯ РЕЗКА

Газопламенная сварка. Газовым пламенем при помощи газовой горелки можно производить сварку плавлением черных и цветных металлов, наплавку твердых и цветных сплавов, правку, пайку, огневую зачистку поверхности и другие операции.

Сварочное пламя и его свойства. Сварочное пламя получают при сжигании газообразных горючих или паров жидких топлив в технически чистом кислороде.

Горючие, применяемые для газовой сварки (табл. 1), представляют собой углеводороды или их смеси с другими газами (C_2H_2, CH_4, C_3H_8, $C_{10}H_8$ и др.) или пары бензина и керосина.

Сгорание горючих в смеси с кислородом сопровождается развитием различных температур пламени, степени концентрированности, выделяющейся теплоты, разного газового состава пламени и его воздействия на металл.

Сварочное пламя — это объем, в пределах которого происходит реакция горения. В пределах этого объема находится зона, ограниченная с одной стороны исходной смесью, с другой — продуктами реакции. В зависимости от условий протекания реакции зона может перемещаться в сторону продуктов реакции или в сторону исходной смеси.

Скорость потока исходной горючей смеси устанавливается такой, чтобы при зажигании и горении пламя не могло проникнуть внутрь канала мундштука (скорость потока мала) или оторваться от сопла мундштука (скорость потока слишком велика).

При сварке объем кислорода, подаваемый в смесь, меньше, чем необходимый для полного сгорания. Догорание газов происходит за счет кислорода воздуха, вследствие этого пламя в различных частях факела неоднородно по теплофизическим параметрам.

В ацетилено-кислородном пламени различают три зоны: внутренний конус (ядро), опирающийся основанием на выходное отверстие мундштука горелки, внутреннюю зону и факел пламени, представляющий видимый объем светящихся газов. Поверхность ядра очерчена тонким светящимся слоем газовой смеси, в котором происходит ее воспламенение, где противоположно направленные скорости движения газовой смеси и горения равны. Малые скорости движения газов у стенки канала мундштука определяют источник зажигания потока смеси.

Размеры и форма сварочного пламени зависят от величины и скорости распространения реакции горения в газовом объеме, которая для различных горючих неодинакова.

Ацетилено-кислородная смесь имеет скорость распространения горения $>$ 10—13 м/с, а смесь заменителей ацетилена с кислородом 7 м/с. Поэтому при одинаковых соотношениях скоростей истечения и распространения горения пламя у заменителей ацетилена (пропан-бутана, природного газа, керосина и др.) длиннее, чем у ацетилена. Кроме того, меньшая скорость горения и является причиной того, что количество передаваемой теплоты на единицу площади сечения сопла горелки и концентрация теплоты на нагреваемой поверхности соответственно уменьшаются. Для получения одинаковой эффективной мощности пламени необ-

ходимо применять мундштук с бо́льшими размерами сопел, что приводит, в свою очередь, к увеличению размеров сварочной ванны.

1. Свойства горючих

Горючее	Рабочее состояние	Плотность, кг/м³	Содержание в газе, % по массе		Пределы взрываемости (%) газов и паров жидкости в смеси				Максимальная температура (°С) пламени газов и паров жидкости в смеси с	
					с воздухом		с кислородом			
			углерода	водорода	Нижний	Верхний	Нижний	Верхний	воздухом	кислородом
Ацетилен (баллонный)	Растворен в ацетоне под давлением до 19 кгс/см²	1,1709	92,3	7,7	1,5	100	1,5	100	2325	3150
Ацетилен (генераторный)	Находится под давлением до 1,5 кгс/см²									
Коксовый газ	Сжатый	0,49—0,8	—	—	4,5	40,0	40,0	75,0	1918	2000
Метан		0,72	75,0	25,0	4,5	15,0	4,5	60,0	1875	2400—2500*¹
Пропан	Сжиженный	2,02	82,0	18,0	2,0	9,5	2,0	48,0	1925	2700—2800*¹
Бутан		2,7	82,5	17,5	1,5	10,0	1,3	47,0	—	—
Керосин	Жидкость	0,8—0,84	86,0	13,7	1,4	5,5	2,0	28,0	1930	2400—2450
Бензин		0,7—0,76	84,0	15,9	0,7	6,0	21,0	28,4	1970	2500—2600

*¹ При подогреве.

Форма и строение пламени всех горючих в смеси с кислородом принципиально одинаковы и зависят от состава горючей смеси:

$$\beta_0 = \frac{O_2}{C_x H_y}.$$

По составу горючей смеси (соотношению газов) сварочное пламя подразделяют на нейтральное, окислительное и науглероживающее. Нейтральное пламя (рис. 1, *а*) имеет ярко выраженный плавноочерченный конус (ядро). Внутри конус состоит из горючего и кислорода. При касании этой частью пламени свариваемого металла последний интенсивно окисляется. На расстоянии 2—3 мм от конца конуса развивается максимальная температура (для ацетилено-кислородного пламени 3150° С). Средняя зона состоит из CO и H_2, т. е. из восстановительных продуктов, которые, взаимодействуя с окислами металла, восстанавливают их. Основная часть факела пламени представляет собой смесь газов типа CO_2, H_2O, N_2 и др. Эта зона имеет окислительный характер и сравнительно низкую температуру.

При подаче в горелку избыточного количества кислорода (рис. 1, *б*) средняя зона может также иметь окислительный характер воздействия на металл, поскольку в ней появляются O_2 и CO_2. При этом размеры конуса и факела пламени сокращаются, пламя приобретает фиолетовую окраску.

При избытке горючего (рис. 1, *в*) конус имеет те же свойства, что и у нейтрального пламени, но из-за недостатка кислорода реакция окисления в слое ядра замедляется, сильнее проявляется процесс пирогенного разложения горючего на производные C_2 и H_2. В этом случае конус удлиняется, его граница несколько размывается, образуется пелена оранжевого цвета в средней зоне (в ней появляется значительное количество свободного углерода и она становится науглероживающей). При большом избытке горючего в объеме факела пламени также имеется свободный углерод, пламя удлиняется и окрашивается в красноватый цвет.

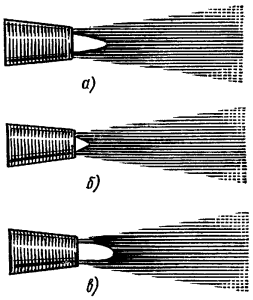


Рис. 1. Схема строения сварочного газокислородного пламени:

а — нейтральное; *б* — окислительное; *в* — науглероживающее

Структурная формула ацетилена состоит из тройной связи: H—C≡C—H. Она образуется при значительных затратах энергии и очень неустойчива, в связи с чем ацетилен более взрывоопасен, чем его заменители. Поэтому при его сгорании уже в конусе пламени выделяется до 40% теплоты. Это происходит из-за положительной теплоты образования ацетилена, разрыва тройной связи C≡C между атомами углерода, большого содержания углерода (92,3% по весу), окисления двух атомов углерода до окиси углерода и образования молекулярного водорода.

Углеводороды типа C_nH_{2n+2} или C_nH_{2n} имеют двойные связи, образованные с меньшими затратами энергии. В результате количество теплоты, выделяемой в конусе пламени, не превышает 25% от теплотворной способности горючего.

Нагрев при газовой сварке ведется областью, расположенной на некотором расстоянии от конуса, первой зоной пламени, которая определяет эффективную мощность, концентрированность и характер действия пламени.

Сгорание горючих в смеси с кислородом протекает в два основных этапа. На первом этапе происходит разложение молекулы газа и сгорание углерода с образованием окиси углерода за счет поступающего из горелки кислорода. На втором этапе водород и окись углерода, взаимодействуя с кислородом окружающего воздуха, образуют пары воды и углекислый газ. Ниже приведены реакции горения различных газов по этапам:

Ацетилен: I. $C_2H_2 + O_2 = 2CO + H_2$;

II. $2CO + H_2 + 1{,}5O_2 = 2CO_2 + H_2O$.

Природный газ (метан): I. $CH_4 + 0{,}5O_2 = CO + 2H_2$;

II. $CO + 2H_2 + 1{,}5O_2 = CO_2 + 2H_2O$.

Пропан: I. $C_3H_8 + 1{,}5O_2 = 3CO + 4H_2$;

II. $3CO + 4H_2 + 3{,}5O_2 = 3CO_2 + 4H_2O$.

Бутан: I. $C_4H_{10} + 2O_2 = 4CO + 5H_2$;

II. $4CO + 5H_2 + 4{,}5O_2 = 4CO_2 + 5H_2O$.

Из реакции первого этапа следует, что при подаче в горелку газов в объемах первой реакции сгорание получается неполным. В качестве продуктов сгорания в средней зоне факела образуются восстановительные газы: CO и H_2. Протяженность этой зоны невелика и составляет несколько миллиметров.

С удалением от среза сопла мундштука в факеле начинают преобладать CO_2 и H_2O, образующиеся при догорании горючего газа за счет кислорода воздуха по реакциям второго этапа.

У всех углеводородных газов наивысшая температура развивается в непосредственной близости от конуса, в средней зоне пламени.

При сварке расплавленный металл сварочной ванны контактирует с пламенем, содержащим CO_2, CO, N_2, H_2O, H_2 и др. В результате в расплавленном металле возникают реакции, которые могут приводить к окислению или науглероживанию металла, выгоранию C, Mn и Si, кипению, разбрызгиванию, образованию пористости и шлаковых включений и т. д. Для уменьшения химического воздействия пламени на металл необходимо поддерживать требуемый состав горючей смеси, плавление вести только средней зоной пламени, применять сварочную проволоку и флюсы соответствующего состава, не допускать в проволоке повышенного содержания P и S, избегать перерывов в работе, защищать факелом пламени расплавленный металл от соприкосновения с окружающим воздухом.

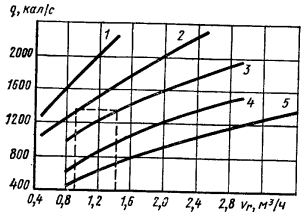


Рис. 2. Эффективная мощность различных видов газокислородного пламени горелки в зависимости от расхода горючего газа:

1 — пропан-бутан ($\beta_0 = 3,5$); *2* — ацетилен ($\beta_0 = 1,15$); *3* — метан ($\beta_0 = 1,5$); *4* — коксовый газ ($\beta_0 = 0,8$); *5* — водород ($\beta_0 = 0,4$)

Производительность нагрева газокислородным пламенем можно повысить до известного предела путем увеличения отношения горючего газа к кислороду (для ацетилено-кислородного пламени до 1,2—1,3). Избыток первичного кислорода в пламени в сочетании со сварочной проволокой, легированной повышенным содержанием Mn и Si, приводит к повышению на 15—20% производительности ацетилено-кислородной сварки (при окислении Mn и Si выделяется дополнительное тепло, что увеличивает тепловой баланс сварочной ванны, повышая ее температуру).

При использовании заменителей ацетилена температура пламени ниже, меньше и количество теплоты, генерируемой в средней зоне. Для нагрева под сварку черных металлов этой теплоты недостаточно. Однако пламя содержит во всех зонах горения свободный кислород, который оказывает окислительное действие на расплавленный металл сварочной ванны. Это свойство пламени и легирование Mn и Si проволокой (типа Св-12ГС, Св-08Г2С, Св-08ГС) с предварительным подогревом горючей смеси до 300° С позволяет использовать газы-заменители для сварки неответственных изделий из низкоуглеродистой стали толщиной до 6 мм, чугуна и цветных сплавов.

Пониженная теплонапряженность пламени заменителей ацетилена возмещается увеличением их расхода, что ведет к увеличению диаметров сопл и размеров струи газовой смеси и пламени. Площадь нагрева металла увеличивается в 2,5—4 раза, а диаметр сварочной ванны в 1,5—2 раза. Для получения одинаковой с ацетилено-кислородным пламенем производительности нагрева металла при работе заменителями ацетилена пользуются коэффициентом замены, который представляет отношение расхода газа-заменителя к расходу ацетилена:

$$\Psi = \frac{V_з}{V_а}.$$

Расход газа-заменителя, эквивалентный по эффективной тепловой мощности соответствующему расходу ацетилена, может быть определен из графика (рис. 2).

В табл. 2 приведены области рационального применения горючих газов при газопламенной обработке металлов.

2. Области рационального применения горючих газов при газопламенной обработке металлов

Операция	Ацетилен	Пропан	Керосин	Природный газ
Сварка стали:				
низкоуглеродистой толщиной до 6 мм	+	+	+	(+)
конструкционной общего назначения	+	—	—	—
конструкционной качественной и высококачественной	+	—	—	—
низколегированной	+	—	—	—
легированной (хромистой, хромо-ванадиевой, марганцово-молибденовой и т. д.)	+	—	—	—
Сварка:				
молибдена	+	—	—	—
чугуна	+	+	+	+
меди	+	—	—	—
латуни	+	+	+	+
бронзы	+	+	+	+
алюминия	+	+	+	+
магниевых сплавов	+	+	+	+
никеля	+	—	—	—
свинца и стекла	+	+	+	+
Пайка и сварка чугуна	+	+	+	+
Пайка	+	+	+	+
Наплавка твердых сплавов	+	+	+	+
Газопрессовая сварка:				
инструментальной стали, цветных металлов (латуни, бронзы)	+	+	+	+
стальных труб, стержней, прутков, полос, профилей	+	(+)	(+)	(+)
Поверхностная очистка конструкционной стали	+	+	+	(+)
Огневая правка, чистка низкоуглеродистой и низколегированной стали	+	+	+	+
Поверхностная закалка железоуглеродистых сплавов	+	+	+	+
Разделительная резка:				
механизированная листовой стали	+	+	+	+
ручная заготовительная и лома	+	+	+	+
металлов больших толщин	+	+	+	+
стального литья	+	+	(+)	+
кислородно-флюсовая	+	+	+	—
подводная	—	—	+ (Бензин)	—
при строительно-монтажных работах	+	+	+	+
Поверхностная резка:				
сплошная огневая зачистка	+	—	—	+
выборочная зачистка в металлургии	+	(+)	—	(+)
вырезка отдельных канавок в машиностроении	+	+	—	+
вырезка канавок при монтаже	+	+	(+)	(+)

Примечания: 1. Знаком «+» отмечены виды работ, при которых использование данного горючего технически возможно и экономически целесообразно.

2. Знаком «—» отмечены виды работ, при которых использование данного горючего по каким-либо причинам нецелесообразно.

3. Знаком «(+)» отмечены те случаи, когда возможность применения данного горючего ограничена.

Типы сварных соединений и подготовка кромок под сварку. Наиболее распространенным соединением является стыковое (табл. 3). При толщине листов до 1,5 мм его выполняют с отбортовкой кромок.

Высоту отбортовки принимают 2—3 мм. Сборку листов производят без зазора. В тех случаях, когда отбортовка кромок невозможна, листы укладывают с зазором 1 мм. Ширина сварочной ванночки при газовой сварке в 2,5—3 раза больше глубины. При сварке деталей толщиной 2—5 мм подготовку кромок не производят и их стыкуют с зазором 1—3 мм, поскольку опасность прожога кромок незначительна.

3. Форма шва и основные размеры подготовки кромок

Вид разделки	Вид соединения и подготовка шва	Толщина свариваемой детали, мм	Элемент разделки		
			h, мм	d, мм	α, градусы
	Стыковое с отбортовкой	До 1,5	2	0—1	—
	Стыковое без скоса кромок	1—5	—	1—1,5	
	Стыковое с односторонним скосом кромок	6—15	1—2	1,5—3	60—90
	Стыковое с двусторонним скосом кромок	15	2—4	3—5	
	Угловое	—			60—120
	Внахлестку				—
	Тавровое без скоса кромок	До 8	—	1—2	
	Тавровое с односторонним скосом кромок	8—12	2—3	1,5—2	50—60
	Тавровое с двусторонним скосом кромок	> 12	2—4	2—4	

При сварке деталей большой толщины применяют V-образную разделку кромок. Часть кромки высотой $^1/_5$ толщины листа оставляют нескошенной. Зазор между стыкуемыми деталями также равен $^1/_5$ их толщины.

При сварке деталей толщиной 3—6 мм с использованием заменителей ацетилена скос кромок делают по всей толщине без притупления с углом скоса 30—45°

и зазором 1—3 мм, так как опасность прожога острой грани кромки в этом случае значительно меньше.

Тавровые и угловые соединения при толщине листов до 5 мм подготовляют без скоса кромок. При сварке необходимо следить за полным проплавлением металла прихваток.

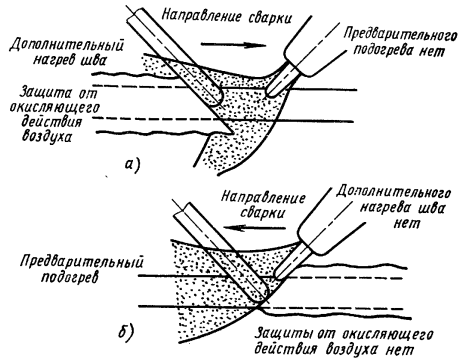


Рис. 3. Способы сварки:
а — правый; *б* — левый

Режимы и техника сварки. Режим сварки зависит от теплофизических свойств металла, габаритных размеров и формы изделия. Он включает выбор способа сварки, мощности и состава пламени, угла наклона горелки, диаметра присадочного прутка, порядка наложения шва, положения шва в пространстве. Различают левый и правый способы сварки (рис. 3).

При левом способе пламя направляют на еще не сваренные кромки металла, а присадочный пруток перемещают перед пламенем, при этом для более полного и равномерного прогрева и перемешивания сварочной ванны горелку и пруток перемещают зигзагообразно (рис. 4, *а*).

При правом способе сварки пламя направляют на уже сваренную часть шва, а пруток перемещают вслед за ним по спирали (рис. 4, *б*). Горелку при этом перемещают прямолинейно. Поперечные колебания горелки при правом способе применяют лишь при сварке металлов больших толщин (рис. 4, *в*). Правый способ сварки повышает производительность процесса при одновременном снижении удельного расхода газов за счет лучшего использования теплоты

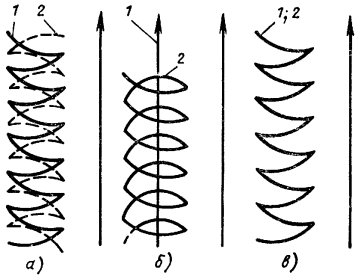


Рис. 4. Схема движения горелки (*1*) и присадочной проволоки (*2*) в зависимости от способа сварки

пламени, а также снижает коробление металла вследствие большей сосредоточенности нагрева.

Левый способ целесообразно применять для сварки металлов толщиной до 4—5 мм, а также металлов с пониженной (по сравнению со сталью) температурой плавления. Кроме того, при левом способе лучше формируется шов.

Качество сварных соединений и производительность процесса сварки в значительной степени зависят от мощности пламени (т. е. от часового расхода горючего газа), которая может быть определена по формуле $M = C\delta$, где M — мощность пламени, л/ч; C — удельный коэффициент мощности пламени (табл. 4); δ — толщина свариваемого металла, мм.

4. Удельный коэффициент мощности пламени

Тип соединения	Низкоуглеродистая сталь	Легированная сталь, чугун	Медь	Медные сплавы	Алюминий
Встык	100	80	130—180	75—85	110—130
Внахлестку	140	110	180—250	100—110	150—180
Втавр	150	120	200—300	100—120	160—200
Угловое	80	70	110—150	70—80	100—120

При сварке листов разной толщины разделку кромок производят при толщине металла > 5 мм и на высоту, равную толщине тонкого листа. Деталь обрабатывают так, чтобы ее толщина постепенно изменялась до толщины тонкой детали — этим достигается одновременность их расплавления при сварке. Постепенное утонение более толстого элемента должно быть на длине, равной пятикратной разнице толщин стыкуемых элементов. Допускается применение стыковых швов без предварительного утонения толстой стенки, если разность толщин соединяемых элементов не превышает 30% толщины тонкого элемента, но не более 5 мм.

Перед сваркой кромки соединяемых элементов и примыкающие к ним поверхности на участке 20—40 мм (с каждой стороны) должны быть зачищены до металлического блеска от ржавчины, масла и других загрязнений. Очистку выполняют металлическими или круглыми приводными щетками, иногда напильниками или наждачной бумагой. При сварке ответственных изделий или газопорошковой наплавке самофлюсующимися материалами поверхности деталей в месте наплавки должны быть тщательно обработаны пескоструйной (в камерах) или дробеструйной установкой или механическим режущим инструментом. Реже применяют химическую очистку специальными пастами на кислотной основе.

Во избежание деформации свариваемых деталей их собирают и прихватывают короткими швами для обеспечения правильного взаимного расположения при сварке. Длину прихваток принимают, в зависимости от толщины свариваемых элементов, равной (3—6) δ, а расстояние между ними равным (20—40) δ. Прихватку предпочтительно выполнять на тех же режимах, что и сварку. Порядок и последовательность наложения прихваток зависят от толщины основного металла и протяженности сварного шва.

Мощность пламени зависит от толщины и состава свариваемого металла. Увеличение мощности приводит к повышению скорости сварки, но одновременно возрастает и опасность пережога металла, натекания расплавленного металла на ненагретые кромки стыка и расширяется зона термического влияния. Поэтому мощность пламени можно увеличивать до определенных пределов. Состав пламени устанавливают по его внешнему виду и в зависимости от свариваемого металла. Угол наклона мундштука горелки к поверхности металла зависит от толщины свариваемых листов и теплофизических свойств металла. Чем толще металл, тем

этот угол больше. Больше он и в начале процесса сварки, когда изделие «холодное», затем он уменьшается до 30—40°. К концу сварки, когда кромки изделия сильно прогреты, во избежание пережога металла угол еще меньше.

В процессе формирования сварного шва горелке придают два вида движения: поперечное по отношению к оси шва и поступательное вдоль оси шва. Поперечное движение необходимо для равномерного прогрева кромок свариваемого металла, одновременного их расплавления и равномерного распределения присадочного металла. При зигзагообразном движении средняя зона пламени прогревает обе кромки на одинаковом расстоянии от оси шва. Зигзаги должны быть непрерывными, нельзя допускать прерывистого движения — это ведет к окислению и образованию шлаковых включений.

При спиралеобразном движении горелки средняя зона пламени также захватывает обе кромки. Горелкой описывают эллипсы, перекрывающие предыдущие витки.

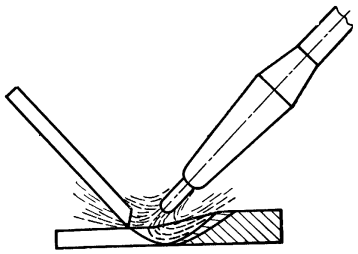


Рис. 5. Положение горелки при сварке

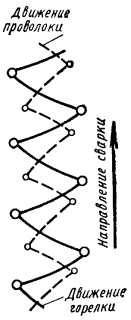


Рис. 6. Движение горелки и присадочной проволоки при сварке угловых швов

Траектории движения горелки и сварочной проволоки зависят от толщины свариваемого металла, требуемых размеров сварного шва и его расположения в пространстве.

Диаметр сварочной проволоки определяют по эмпирическим формулам:

для левого способа $d = \frac{\delta}{2} + 1$;

для правого способа $d = \frac{\delta}{2}$,

где δ — толщины элементов, мм; d — диаметр проволоки, мм.

Сварку производят при непрерывном нагреве кромок металла пламенем горелки и подаче в зону нагрева присадочной проволоки (рис. 5). При сварке образуется сварочная ванна расплавленного металла, который собирается в валик сварного шва давлением газов и сварочной проволокой.

Сварочную проволоку располагают под углом $\sim 45°$ в сторону, противоположную наклону мундштука горелки. Ей сообщают колебательные зигзагообразные движения в направлении, противоположном движению горелки, что способствует хорошему перемешиванию металла в ванне и равномерному его распределению.

Угловые швы сваривают по схеме, приведенной на рис. 6. Пламя и конец присадочной проволоки перемещают так же, как и в первом случае, но с большей их задержкой по краям шва и меньшей посередине.

При сварке элементов толщиной менее 3 мм по отбортовке ацетилено-кислородным пламенем присадочную проволоку не применяют. Горелке придают спиралеобразные или колебательные движения (рис. 7).

В случае выполнения сварки встык деталей малых толщин применяют способ, основанный на последовательном образовании сварочных ванночек (рис. 8).

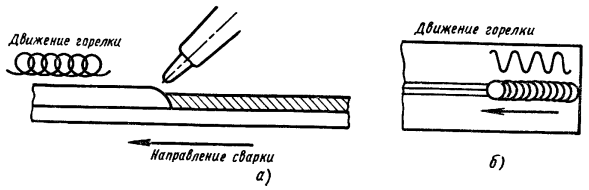


Рис. 7. Движение горелки при сварке по отбортовке:
а — спиралеобразное; *б* — колебательное

Сущность его основана на периодическом введении в расплавленный металл сварочной ванны присадочной проволоки и ускорении тем самым ее кристаллизации.

Сварку в наклонном положении выполняют снизу вверх и значительно реже сверху вниз. Мундштук горелки располагают под углом 45° к оси шва, ему сообщают спиралеобразные или зигзагообразные движения. Сварку ведут небольшими участками во избежание стекания жидкого расплавленного металла из зоны сварки.

Сварку в вертикальном положении осуществляют снизу вверх всегда левым способом. Пламя направляют на кромки и проплавляют в них отверстие, равное толщине листа, затем

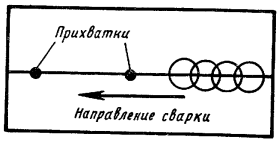


Рис. 8. Схема сварки методом последовательного образования сварочных ванночек

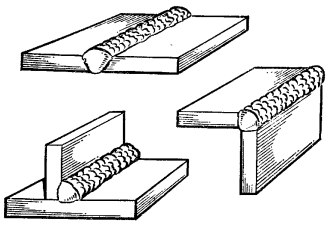


Рис. 9. Вид нормальных швов, выполненных газовой сваркой

присадочной проволокой заплавляют нижний край отверстия, перемещая горелку вверх, при этом верхняя часть отверстия подплавляется, поэтому обеспечивается непрерывность процесса. Сварной шов формируется с двух сторон и получается более плотным, чем при сварке в нижнем положении.

Горизонтальные швы (на вертикальной плоскости) заваривают правым способом, препятствующим стеканию металла из сварочной ванны.

Потолочные швы лучше формируются при правом способе сварки, так как конец присадочной проволоки и давление газового потока препятствуют стеканию металла. При выполнении этих швов левым способом, как правило, образуются значительные натеки металла и валик плохо формируется.

Хорошо выполненные сварные швы (рис. 9) имеют провар по всему сечению, плавное примыкание краев наплавки к основному металлу и нормальное усиление шва в средней его части.

Большое количество теплоты, вводимой в металл при сварке, и значительная ширина зоны теплового влияния пламени создают условия, соответствующие медленному охлаждению металла и возникновению в нем крупнокристаллической структуры, типичной для литого металла. Столбчатая структура образуется при сварке меди и алюминия из-за высокой их теплопроводности и интенсивного отвода теплоты от шва в основной металл.

Свариваемость металлов. Низкоуглеродистая сталь хорошо сваривается нейтральным пламенем при содержании углерода до 0,2%, удовлетворительно — до 0,35% (нормализацию выполняют повторным нагревом сварного шва до 930—950° С).

Низколегированную конструкционную сталь сваривают так же, как и низкоуглеродистую. При сварке легированной стали наибольшее влияние на свариваемость оказывает углерод. При 0,2% углерода свариваемость хорошая; при 0,2—0,3% — удовлетворительная; при 0,3—0,4% — ограниченная (требуется подогрев деталей); свыше 0,4% — плохая. Для сталей, содержащих 0,3% углерода, сварочное пламя устанавливают с небольшим количеством избытка горючего в пламени. Термически обрабатываемая сталь перлитного класса при содержании углерода не более 0,3—0,35% сваривается удовлетворительно. Подогрев до 150—250° С предупреждает образование закалочных трещин в зоне шва. Мартенситная сталь сваривается плохо, требует общего подогрева до 400—500° С. Аустенитная сталь при низком содержании углерода сваривается хорошо. Карбидная инструментальная сталь допускает сварку только в малых объемах, но достаточно хорошо наплавляется.

Легирующие элементы при невысоком их и углерода содержании содействуют получению высокого качества сварного соединения.

В средне- и высоколегированной стали при содержании углерода > 0,25% многие элементы (Mn, Cr, Ni, Mo, W) повышают склонность стали к закалке и образованию трещин.

Для присадки используется проволока по ГОСТ 2246—70.

Серый чугун сваривается качественно нейтральным пламенем (присадочные прутки по ГОСТ 2671—70 и флюс № 209). Во избежание образования трещин при сварке чугунных деталей сложной формы производят общий подогрев их до 450—550° С с последующим охлаждением после сварки в печи или под теплоизолирующим чехлом.

Детали простой формы сваривают без общего подогрева. Сварка чугуна латунью или присадочными материалами на ее основе дает хорошие результаты.

Медь марок М1 и М2 качественно сварить можно только нейтральным пламенем. Из-за высокой теплопроводности ее требуется большая мощность пламени горелки. В качестве присадки используют проволоку из электрической меди. Применяют флюсы. После сварки рекомендуется горячая проковка сварного шва. Перегрев ведет к окислению и охрупчиванию сварного шва. При сварке медь и все ее сплавы поглощают водород, являющийся источником пор и так называемой водородной хрупкости.

Латунь сваривается пламенем, содержащим избыток кислорода в средней (восстановительной) зоне. Применяют флюсы те же, что и для меди. Присадочный материал — проволока типа ЛОК-1—62 и др.

Оловянистая бронза сваривается хорошо при содержании олова до 7%.

Кремнистая или марганцовистая бронза относятся к хорошо свариваемым материалам.

Алюминий сваривается хорошо нейтральным пламенем при обязательном применении флюса для удаления поверхностной пленки из тугоплавкой окиси алюминия. После сварки необходима тщательная очистка соединения от флюса, остатки которого вызывают быструю коррозию сварных швов. Алюминиевая бронза сваривается удовлетворительно с применением активных флюсов.

Свинец сваривается хорошо, но требует высокой квалификации сварщика.

Кислородная резка. Кислородной резкой называют способ разделения металла, основанный на использовании для его нагрева до температуры воспламенения теплоты газового пламени и экзотермической реакции окисления металла, а для удаления окислов — кинетической энергии струи режущего кислорода. Для повышения количества теплоты, выделяющейся в полости реза, и перегрева образующихся тугоплавких окислов с целью повышения их жидкотекучести, облегчающей эвакуацию из полости реза, в последнюю подается флюс — порошок железа с добавками. Такой процесс носит название кислородно-флюсовой резки.

Резка может осуществляться на всю толщину металла (разделительная) или на ее часть (поверхностная) вручную или с помощью машин, обеспечивающих различную степень механизации и автоматизации основных и вспомогательных операций.

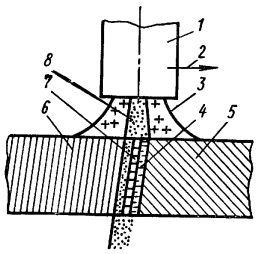


Рис. 10. Схема процесса разделительной кислородной резки:

1 — мундштук; *2* — направление резки; *3* — подогревающее пламя; *4* — жидкий металл; *5* — разрезаемый металл; *6* — линии отставания; *7* — слой окислов; *8* — струя кислорода

Кислородную резку наиболее широко применяют в машиностроении, судостроении, металлургии, при выполнении монтажных и строительных работ [1, 4, 5]. Чаще всего резке подвергают черные металлы и сплавы титана в виде листового и фасонного проката, прибылей литья, труб, поковок и отливок.

Поверхностную резку применяют для удаления дефектов на литье и прокате, выплавки корня шва и образования канавок.

Схема процесса резки. Процесс разделительной кислородной резки схематично представлен на рис. 10. Подогревающее пламя нагревает поверхностные слои металла, которые затем контактируют со струей чистого кислорода и окисляются. Выделяющаяся при этом теплота совместно с теплотой подогревающего пламени постоянно нагревает за счет теплопроводности металл впереди резака до температуры его воспламенения в кислороде, обеспечивая непрерывность процесса. Под действием кинетической энергии струи кислорода слой окислов, а также частично жидкий металл удаляются из разреза. На поверхности реза остаются характерные линии отставания, представляющие собой чередующиеся выступы и впадины глубиной в десятые доли миллиметра.

Кислородная резка — совокупность взаимосвязанных тепловых, физико-химических и газогидродинамических процессов.

Распределение температур в твердом металле рассчитывают по формулам теории тепловых процессов, разработанной Н. Н. Рыкалиным причем чаще всего применяют схему линейного быстродвижущегося или подвижного источника теплоты в пластине или плоском слое. При расчетах, как правило, не учитывается теплоотдача с поверхности листа и изменение теплофизических свойств металла от температуры.

Температуру жидкого металла и шлака непосредственно в разрезе не вычисляют из-за отсутствия надежных методов и значений необходимых теплофизических характеристик металла.

Экспериментальные измерения температуры металла в зоне теплового влияния согласуются с расчетами и показывают зависимость термических циклов резки от состава и толщины стали, скорости резки, мощности подогревающего пламени и других параметров.

Источником теплоты при резке служит подогревающее пламя резака и экзотермическая реакция окисления железа и примесей стали. В зависимости от толщины стали изменяются доли их участия в тепловом балансе: чем меньше толщина разрезаемого металла, тем больше роль подогревающего пламени (при толщине 5 мм до 80% общего количества теплоты, выделяемой при резке, при толщине >50 мм — только до 10%).

Эффективная тепловая мощность источника тепла при резке, определенная экспериментально, зависит от толщины стали, мощности пламени и скорости резки. Для стали толщиной 10—20 мм она составляет 1,5—2 ккал/с, толщиной 40—50 мм — 3—4 ккал/с.

В соответствии с диаграммой состояния Fe—O при окислении железа возможно образование трех окислов: FeO, Fe_2O_3 и Fe_3O_4. Окисление при температурах > 680° С идет с преимущественным образованием FeO, причем скорость реакции бесконечно высока и не может ограничивать скорость процесса резки. На границе ядра кислородной струи и шлака образуется слой кислорода толщиной 0,01—0,15 мм, содержащий значительное количество других газов (N_2, CO_2, Ar, SO_2, P_2O_5). Азот и аргон входят в состав примесей кислорода, остальные газы образуются в результате окисления примесей стали. Содержание примесей, а значит и толщина слоя загрязненного кислорода, тем больше, чем ниже чистота режущего кислорода и больше примесей в стали. Ядро кислородной струи турбулентно, а граничный загрязненный слой, соприкасающийся с жидким шлаком, имеет ламинарное строение. Жидкий шлак, состоящий из смеси железа и его окислов, имеет турбулентное или близкое к нему истечение, т. е. частицы FeO и Fe могут перемещаться как вдоль, так и поперек потока, обеспечивая контакт между вступающими в реакцию кислородом и железом. Слой турбулентного шлакового потока постепенно переходит в ламинарный поток жидкого железа.

Скорость процесса резки ограничивается скоростью диффузии кислорода из ядра струи через загрязненный слой, а также процессами турбулентного (или близко к турбулентному) переноса железа и кислорода в шлаковом расплаве. Для увеличения производительности резки необходимо интенсифицировать доставку кислорода к жидкому металлу.

В последние годы в связи с быстрым развитием процесса газолазерной резки, при которой в качестве источника тепла используется луч лазера, обеспечивающий высокую плотность энергии на поверхности разрезаемого материала (более 10^6 Вт/см^2), была сделана попытка комплексного аналитического решения задачи нагрева металла лучом лазера с учетом термогазогидродинамических условий процесса.

Условия резки и разрезаемость. Прежде всего теплоты должно быть достаточно для того, чтобы обеспечить температуру реакции порядка 1000—1150° С. Следовательно, источник теплоты должен иметь необходимую мощность и интенсивность. Если, например, при кислородной резке стали теплоты выделяется достаточно, то иначе обстоит дело при обработке меди и ее сплавов. Помимо высокой теплопроводности меди, сильно затрудняющей начало процесса резки, другой причиной, делающей процесс кислородной резки невозможным, является низкое тепловыделение при окислении. Поэтому резку меди можно производить, применяя более мощный тепловой источник — электрическую дугу.

Второе условие — температура плавления металла должна быть выше температуры его интенсивного окисления в кислороде, иначе металл при нагреве будет плавиться и принудительно удаляться из разреза без характерного для процесса резки окисления. У низкоуглеродистой стали температура плавления составляет 1500° С, а температура воспламенения — около 1350° С, т. е. это условие соблюдается. По мере повышения содержания углерода в стали процесс резки ухудшается из-за снижения температуры плавления и повышения температуры воспламенения. Чугун, содержащий более 1,7% углерода, кислородной резкой не обрабатывается.

Третье условие — температура плавления металла должна быть выше температуры плавления образуемых в процессе резки окислов, иначе тугоплавкие окислы изолируют металл от контакта с кислородом. Это условие не удовлет-

воряется при резке алюминия, магния и их сплавов, а также стали с большим содержанием хрома и никеля. При нагревании этих сплавов в процессе резки на их поверхности образуется пленка тугоплавкого окисла, препятствующая поступлению кислорода к неокисленному металлу.

Четвертое условие — образующийся шлак должен быть жидкотекучим, в противном случае контакт кислорода с жидким металлом будет замедлен или вовсе невозможен. Вязкость шлака значительно возрастает при увеличении содержания окислов кремния и хрома, что является одной из причин невозможности вести кислородную резку чугуна.

Всем перечисленным условиям удовлетворяют сталь, титан и марганец, поэтому их можно обрабатывать с помощью кислородной резки. Особенно хорошо режутся сплавы титана, благодаря высокому сродству с кислородом и высокому тепловому эффекту образования окисла.

5. Технологические рекомендации по резке высоколегированных сталей [1]

Группа стали по разрезаемости	Структурные классы стали	Характеристика группы		Режимы термической обработки	
		$\frac{Cr_{эк}}{Ni_{эк}}$	$Cr_{эк}+Ni_{эк}$	до резки	после резки
I	Мартенситные	$\leqslant 2{,}5$	$\leqslant 30$	Подогрев до 250—350 °С	Закалка с отпуском либо отпуск при 650—950 °С
II	Мартенситно-ферритные	$\geqslant 2{,}5$	$\geqslant 30$	Без подогрева. Большие сечения, сложная конфигурация — подогрев до 250—350 °С	Отпуск или отжиг при 650—950 °С
III	Ферритные			Без подогрева	Нагрев до 750—850 °С и быстрое охлаждение в воде
IV	Аустенитно-ферритные	1,25—2,5			Термической обработки не требуется
V	Аустенитные	$\leqslant 1{,}25$			Нагрев до 1050—1150 °С с последующим быстрым охлаждением либо интенсивное охлаждение кромки водой во время резки

Углеродистую сталь по разрезаемости принято [1,5] делить на две группы: слабозакаливающуюся с содержанием углерода до 0,25% и закаливающуюся, требующую для устранения трещин предварительного нагрева и медленного охлаждения после резки.

Температура предварительного подогрева может быть определена по формуле

$$T_п = 500\sqrt{C_{эк}(1+k_{т.с}\delta)-0{,}45},$$

где $k_{т.с}$ — коэффициент, учитывающий толщину разрезаемой стали, равный 0,0002; δ — толщина металла, мм; $C_{эк}$ — эквивалентное содержание углерода

в стали, %; определяется по температуре мартенситного превращения или по формуле

$$C_{эк} = \frac{550-Mн}{360} = C+0{,}155\,(Cr+Mo)+0{,}14\,(Mn+V)+0{,}11Si+0{,}045\,(Ni+Cu).$$

Разрезаемость высоколегированных хромоникелевых и хромистых сталей рекомендуется оценивать по сумме эквивалентного содержания хрома и никеля в стали ($Cr_{эк}+Ni_{эк}$) и по хромоникелевому эквиваленту ($Cr_{эк}/Ni_{эк}$, табл. 5). Если сталь занимает промежуточное положение между двумя соседними группами, то ее относят к той группе, для которой значения ($Cr_{эк}/Ni_{эк}$) и ($Cr_{эк}+Ni_{эк}$) соответствуют содержанию легирующих элементов, взятых по верхнему пределу.

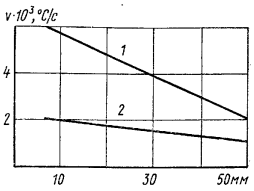


Рис. 11. Зависимость максимальных скоростей нагрева и охлаждения от толщины разрезаемой стали:

1 — скорость нагрева; *2* — скорость охлаждения

Влияние резки на структуру, состав и механические свойства стали [1, 3, 5]. Для термического цикла резки характерны большие скорости нагрева и охлаждения (рис. 11), превышающие в 2—3 раза скорости нагрева и охлаждения металла при дуговой сварке. В металле кромки реза под действием термического цикла происходят сложные изменения структуры, химического состава и механических свойств. Протяженность зоны таких изменений зависит в основном от состава, толщины стали и скорости резки (табл. 6).

В зоне теплового влияния различают оплавленный и твердый металл. Непосредственно на кромке реза имеется окисная пленка толщиной в доли миллиметра, граничащая с оплавленным металлом, толщина которого составляет в среднем 10% от глубины зоны влияния. К оплавленному слою примыкает твердый металл, нагреваемый значительно выше температуры Ac_3. По мере удаления от кромки температура нагрева металла уменьшается.

6. Протяженность зоны теплового влияния для углеродистой стали

Толщина разрезаемой стали, мм	Скорость резки, мм/мин	Расход кислорода, м³/ч	Расход ацетилена, м³/ч	Протяженность зоны для стали, мм		
				низкоуглеродистой	среднеуглеродистой	хромоникелевой
25	250	4,5	0,6	0,4—0,7	0,8—1,5	2—3
50	170	7,5	0,75	1,0—1,5	1,5—2,5	3—4
100	125	12	1,0	1,5—2,0	2,0—3,0	4—5
250	100	21	1,2	2,0—3,0	3,0—5,0	5—8

Кромки реза углеродистой, низко- и среднелегированной стали обогащаются углеродом, никелем и медью, а содержание марганца, хрома и кремния снижается (рис. 12). Кроме того, происходит аналогичное изменение состава по толщине металла, достигая максимума у нижней кромки. Изменение химического состава происходит в основном в литом слое. Глубина слоя с измененным химическим составом зависит от толщины стали и режимов резки и составляет 0,02—0,2 мм. Степень науглероживания кромки реза зависит от толщины стали, исходного содержания углерода, режимов резки. При прочих равных условиях концентрация углерода в металле кромки возрастает при уменьшении скорости

резки, увеличении толщины металла и содержания углерода в исходном металле. Вероятно, изменение состава связано с избирательным характером окисления легирующих элементов в зависимости от их сродства к кислороду.

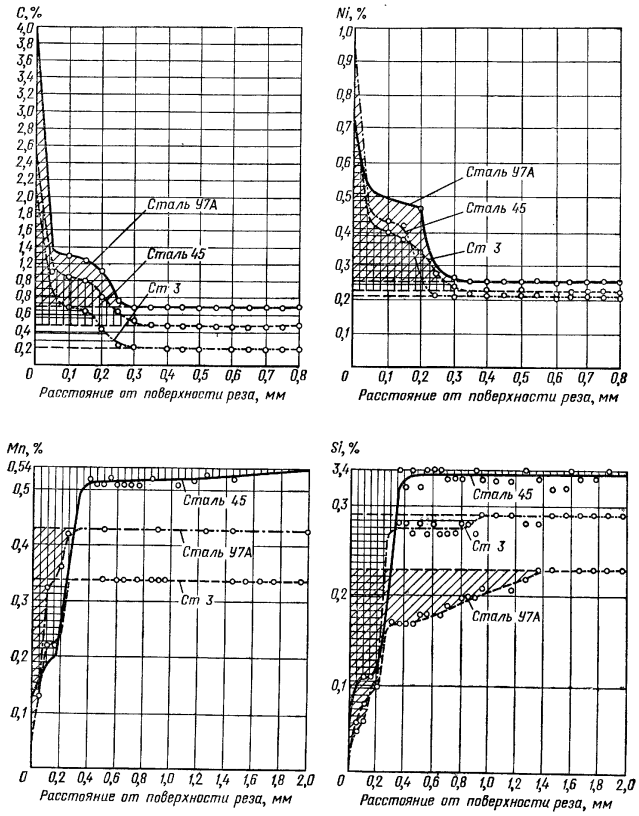


Рис. 12. Изменение содержания основных элементов в поверхностном слое образцов подвергнутых кислородной резке

Кислородно-флюсовая резка вызывает значительное уменьшение содержания легирующих элементов (за исключением никеля) на поверхности реза и вблизи от нее (табл. 7), при этом максимальная глубина слоя с измененным составом не превышает 0,3 мм. Нагрев металла перед резкой увеличивает степень выгорания

легирующих элементов, а увеличение скорости резки, наоборот, способствует снижению степени выгорания легирующих элементов.

7. Влияние кислородно-флюсовой резки на химический состав металла

Марка стали	Толщина, мм	Место анализа	Содержание легирующих элементов, %				
			Cr	Mn	Ni	Si	Прочие
12Х18Н9Т	14	Основной металл Поверхность кромки	18 4,3	0,62 0,21	9 8,5	0,7 0,21	0,75Ti 0,21Ti
13Х14Н3В2ФР	12	Основной металл Поверхность кромки	15 5,5	0,45 0,19	3,4 6,2	0,32 0,17	2,6W; 0,2V 2,4W; 0,14V
08Х17НВМ3Т	14	Основной металл Поверхность кромки	18,3 3,5	0,79 0,26	14,35 9,4	0,77 0,36	3,35Mo; 0,41Ti 3,2Mo; 0,21Ti
12Х13	10	Основной металл Поверхность кромки	12,8 7,57	0,5 0,18	0,25 0,51	0,45 0,14	— —

Изменения структуры и химического состава вызывают изменения механических свойств металла кромки. Микротвердость металла в зоне теплового влияния для низкоуглеродистой стали толщиной 20 мм составляет HV 200—220, а у основного металла HV 150—160, для стали У12 соответственно HV 550 и HV 230. Увеличение скорости резки приводит к снижению глубины зоны влияния, однако протяженность литого слоя и микротвердость металла возрастают. Твердость металла может быть снижена предварительным или сопутствующим подогревом.

Образование закалочных структур на поверхности реза снижает пластичность и усталостную прочность, но мало влияет на ударную вязкость (табл. 8). Усталостная прочность у образцов кислородной резки на 20—40% ниже, чем у образцов с механически обработанными кромками, причем более существенное снижение усталостной прочности характерно для более высокопрочной стали.

8. Влияние способов обработки на ударную вязкость стали

Толщина металла, мм	Ударная вязкость, кгс·м/см²	
	Кромка обработана механическим способом	Кромка после кислородно-флюсовой резки с зачисткой наждачным кругом
25	16,6—15	17,5—12,9
40	12,8—14,2	13,4—14,4

Разновидности кислородной разделительной резки. Основными параметрами процесса кислородной резки являются характеристики подогревающего пламени (мощность и соотношение смеси) и струи режущего кислорода (давление, расход, форма, чистота). Подогревающее пламя имеет при резке нейтральный характер ($\beta_0 = 1{,}1$ для ацетилена и $\beta_0 = 3{,}5$ для пропан-бутановой смеси). Мощность подогревающего пламени увеличивают с увеличением толщины разрезаемого металла (табл. 9). Замена ацетилена другими горючими газами приводит к увеличению времени предварительного нагрева металла.

Режущий кислород окисляет металл по всей толщине и удаляет образующиеся окислы из разреза. Необходимо стремиться к получению в резе тонкой, слабо загрязненной примесями и с наибольшей кинетической энергией струи, сохранить эти параметры неизменными по всей толщине разрезаемого металла. В табл. 9 приведены чаще всего применяющиеся на практике параметры режу-

щей струи, истекающей из ступенчато-цилиндрического сопла, а также скорости резки стали.

Чистота кислорода существенно влияет на скорость резки

$$v = \frac{v_{99,5}}{\sqrt[4]{2\,(100-\varepsilon)}},$$

где $v_{99,5}$ — скорость резки при чистоте кислорода 99,5%; ε — чистота кислорода, % (ее повышение на 1% (с 98 до 99%) позволяет увеличить скорость резки на 25—35%).

9. Режимы механизированной кислородной резки

Показатель	Толщина стали, мм							
	3	5	8	10	15	20	30	40
Скорость резки деталей (1 класс качества поверхности реза), мм/мин	540	490	450	420	380	350	310	290
Давление, кгс/см²: кислорода (перед резаком)	1,5	2,2	3,5	4	2,8	3,5	3	3,5
ацетилена (перед машиной)	Не менее 0,3							
Расход, м³/ч: режущего кислорода	0,7	0,9	1,3	1,4	2,8	3,3	5,5	6,2
подогревающего кислорода	0,3—0,5							
ацетилена	0,25—0,45							

Показатель	Толщина стали, мм							
	50	60	80	100	150	200	250	300
Скорость резки деталей (1 класс качества поверхности реза), мм/мин	260	250	210	200	160	130	100	80
Давление, кгс/см²: кислорода (перед резаком)	4	3,5	4	4,5	7	8	7	8
ацетилена (перед машиной)	Не менее 0,3							
Расход, м³/ч: режущего кислорода	6,9	9,6	10,7	11,8	19,5	23	25,5	28
подогревающего кислорода	0,5—0,65							
ацетилена	0,45—0,55							

Ниже приводятся основные особенности разновидностей кислородной резки.

Скоростная кислородная резка обеспечивает повышение скорости резки листовой стали толщиной 3—20 мм в 2—3 раза. Достигается это за счет наклона резака на 45° в сторону, обратную направлению перемещения. Однако качество резки на таких скоростях низкое, после резки требуется механическая обработка кромок. Улучшение качества скоростной резки достигается применением специальных мундштуков с двумя или тремя каналами для режущего кислорода.

В этом случае обеспечивается увеличение скорости резки низкоуглеродистой стали толщиной 3—30 мм в 1,5—3 раза при сохранении хорошего качества поверхности реза.

Высококачественная скоростная кислородная резка (смыв-процесс) позволяет разрезать листовую сталь толщиной до 30 мм в 1,5—2,5 раза быстрее, чем обычная кислородная резка, причем на поверхности реза отсутствуют бороздки, характерные для обычной резки. Как и при скоростной резке, угол атаки острый, он составляет 25°. Мундштук резака имеет три отверстия для режущего кислорода, расположенные по углам равнобедренного треугольника. Впереди перемещается основная режущая струя, которая осуществляет резку металла на всю толщину. Две другие струи расположены по обе стороны от основной и несколько позади нее, при резке они «зачищают» горячие кромки, образованные основной струей (шероховатость кромки не превышает 9 мкм). Способ по сравнению с обычной кислородной резкой характеризуется меньшей глубиной зоны теплового влияния, более однородной структурой и составом металла, что обусловливает более высокие механические свойства металла кромки.

Недостатком способа резки с острым углом атаки является невозможность осуществления фигурных резов и большая ширина реза.

Кислородная безгратовая резка позволяет устранить один из существенных недостатков способа — образование на нижних кромках деталей трудноудаляемых натеков окислов и расплавленного металла (грата). Для получения деталей без грата или с небольшим количеством легкоотделимого грата необходимо обеспечить максимальное окисление металла [1], что достигается применением кислорода возможно большей чистоты (не ниже 99,5%), использованием минимальной мощности подогревающего пламени, снижением на 15—20% скорости резки, поддержанием постоянными скорости резки, расстояния между мундштуком и металлом, давления газов.

Резка кислородом высокого давления обеспечивает увеличение скорости резки металла толщиной до 50 мм на 30—50%, при этом давление режущего кислорода повышается до 50 кгс/см². Кроме того, достигается уменьшение на 30—50% ширины реза и термических деформаций деталей. Применение одновременно высокого давления кислорода и острого угла атаки позволяет повысить скорость резки низкоуглеродистой стали толщиной до 25—30 мм в 2—4 раза без снижения качества резки. Таким образом, скорость резки металла толщиной 10—15 мм может достигать 2,5—3 м/мин, металла толщиной 25 мм — 1,5 м/мин.

Поверхностная кислородная резка. В этом случае струя кислорода направлена к поверхности обработки под острым углом 20—30°. Как и при разделительной резке, металл в начале и в процессе резки нагревается подогревающим пламенем и теплотой экзотермической реакции окисления железа. В отличие от разделительной резки металл, расположенный впереди резака, нагревается перемещающимся нагретым шлаком. Наклонное направление струи кислорода, небольшая скорость ее истечения (давление кислорода не более 4—5 кгс/см²) приводят к деформированию струи, которая, врезавшись в подогретый металл на некоторую глубину, отражается от поверхности канавки, увлекая при этом расплавленный металл. На поверхности листа образуется канавка, имеющая в поперечном сечении полукруглую или параболическую форму. Кислородную строжку можно выполнять одной кислородной струей в несколько проходов или в один проход одновременно несколькими струями. Ширина канавки зависит в основном от размеров выходного сечения канала режущего кислорода в мундштуке. Значительное влияние на производительность процесса и величину снимаемого слоя оказывает температура металла перед зачисткой. Например, при зачистке металла, нагретого до 1100° С, производительность примерно в 6 раз выше, а расход кислорода меньше, чем при строжке холодного металла.

Режимы поверхностной обработки, рекомендуемые в судостроении, приведены в табл. 10.

10. Режимы поверхностной резки низкоуглеродистой стали

Параметры резки	Толщина обрабатываемого металла, мм		
	6—10	11—16	Более 17
Размеры канавок, мм:			
ширина	5—7	7—12	12—16
глубина	1,5—3	3—5	5—10
Давление, кгс/см²:			
кислорода	2—3	3—3,5	3,5—4
ацетилена	0,2—0,3	0,2—0,3	0,2—0,3
Скорость строгания, мм/мин	430—370	370—220	220—170
Расход кислорода (чистота не менее 99,2%), л/мин	26—56	62—64	86—150
Расход ацетилена, л/мин	11—14	15—16	17—19
Масса выплавленного металла, г/мин	30—60	60—120	120—240

Кислородно-флюсовая резка металлов и неметаллических материалов. При кислородно-флюсовой резке в зону реакции вводят дополнительно порошкообразный флюс, интенсивно окисляющийся или плавящийся в зоне реакции и разжижающий образующие шлаки. Увеличение количества выделяющейся при этом процессе теплоты позволяет применять его для резки материалов, окисление которых связано с образованием тугоплавких и вязких соединений. Расчет состава флюса для резки конкретного металла производят по диаграммам состояния из условий получения шлакового состава с минимальной температурой плавления и вязкостью.

Кислородно-флюсовой резке подвергают высоколегированную сталь, чугун, сплавы меди и алюминия, зашлакованный металл, а также неметаллические материалы — огнеупоры и железобетон.

В табл. 11 приведен состав флюсов, применяющихся при резке этих материалов.

11. Составы флюсов для кислородно-флюсовой резки материалов

Разрезаемый материал	Состав флюса
Высоколегированная хромистая и хромоникелевая сталь	1. Железный порошок 100 2. Кварцевый песок 100 3. Доломитизированный известняк 100 4. Двууглекислый натрий 98—99, фосфористый кальций 2—1
Чугун	1. Железный порошок 100 2. Кварцевый песок 100 3. Доломитизированный известняк 100
Цветные металлы, огнеупоры, бетон	1. Железный порошок 35—90, алюминиевый порошок 65—10 2. Железный порошок 50—55, алюминиевый порошок 20—40, азотнокислый натрий и кальций 30—5

Производительность и экономичность кислородно-флюсовой резки зависят в первую очередь от чистоты, давления и расхода режущего кислорода, состава и расхода флюса. Рекомендуемые режимы фигурной кислородно-флюсовой резки стали 12Х18Н9Т приведены в табл. 12. Скорость прямолинейной резки может быть увеличена на 50—60%.

12. Режимы кислородно-флюсовой резки стали 12Х18Н9Т

Режимы резки	Толщина разрезаемой стали, мм						
	10	20	30	40	60	80	100
Расход, м³/ч:							
режущего кислорода	5,7	8,4	10,6	12,5	16	18,5	21
подогревающего кислорода	0,85	0,95	1	1	1,1	1,1	1,15
ацетилена	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	0,95	1
Средняя ширина реза, мм	4	5	6	6,5	7,5	8	9
Скорость резки, мм/мин	460	345	290	260	225	200	180
Отставание линии реза, мм	1	2	3	4	6	8	10
Расход флюса, кг/пог. м	0,25	0,35	0,45	0,5	0,6	0,7	0,75

Кислородно-флюсовую резку широко применяют в тяжелом машиностроении и металлургии для обрезки прибылей литья, резки слябов и блюмов в холодном состоянии, отрезки от горячего слитка мерных заготовок (в установках непрерывной разливки стали). При кислородно-флюсовой резке очень высокие (неоптимальные) скорости истечения кислородной струи не повышают скорости процесса, так как частицы флюса не успевают окислиться в резе, они догорают ниже его. Кроме того, из-за большой кинетической энергии струи, частицы флюса отбрасываются к периферии струи, поэтому они окисляются не полностью.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЗКА

Электрической резкой называют способы проплавления материала по заданной траектории с образованием разделительного или поверхностного реза за счет использования теплоты, выделяемой электрическими источниками энергии. При этом могут быть применены (табл. 13) нагрев электрической дугой, контактным сопротивлением и индукционный.

13. Принципиальная классификация способов электрической резки

Вариант процесса		Вид источника нагрева		
		Индукционный	Контактный	Дуговой
Безгазовый		Резка труб растяжением	Электроконтактная резка	Дуговая резка угольным, графитовым или металлическим электродом
Резка со струей газа	Неокисляющего	—		Воздушно-дуговая резка
	Окисляющего	Кислородная резка с нагревом ТВЧ	Кислородная резка с контактным нагревом	Кислородно-дуговая резка трубчатым электродом или отдельным соплом
Резка со струей плазмы	Неокисляющей	—		Плазменная резка азотом, аргоном, водородом, гелием или их смесями
	Окисляющей			Плазменная резка кислородсодержащими средами

Индукционный нагрев при резке металлов еще не получил широкого распространения. В отдельных случаях его применяют для разделения труб на мерные отрезки (нагрев по периметру и последующий разрыв осевым усилием) или им заменяют газопламенный нагрев при резке струей кислорода.

Контактный нагрев также используют при резке кислородом. Наряду с этим он положен в основу способов электроконтактной резки. При резке используют комплекс элементарных актов расплавления и механического удаления металла в электрическом контакте. Наряду с электроэрозионными и другими подобными процессами контактный нагрев рассматривают в составе электрофизических методов обработки.

Наибольшее практическое значение в настоящее время имеют электрические способы резки, основанные на использовании электрического дугового разряда. Теплота в электрической дуге выделяется у оснований дугового столба на поверхностях электродов (катодная и анодная области дуги), а также в плазме, заполняющей межэлектродный промежуток. Способы резки с преимущественным использованием энергии, выделяющейся в приэлектродных областях, называют дуговыми. Способы с использованием энергии плазмы объединяют термином — плазменные.

Резка угольной дугой при повышенных токах сейчас находит ограниченное применение. Она характеризуется пассивным удалением расплава из образующейся полости реза. При этом возникают большие потери энергии, а получаемый рез имеет неровные сильно оплавленные кромки, загрязненные газовыми и шлаковыми включениями. Для местной подгонки свариваемых элементов металлических конструкций, удаления небольших участков дефектных швов используют дуговую резку металлическими покрытыми электродами. Выплавляя металл возвратно-поступательными движениями электрода, возможно получить заданные разъем или полость в металлическом теле, произвольно расположенном в пространстве. Предпочтительны электроды для резки со специальными экзотермическими или газообразующими покрытиями. Образующиеся при горении дуги на рабочем торце электрода «козырек» из покрытия и поток окисляющих газов способствуют интенсификации удаления металла. Для резки постоянным и переменным током в СССР разработаны электроды АНР-2, АНО-4 и др.

Наиболее высокие энергетическую эффективность и качественные результаты резки получают, дополняя плавящее действие дуги действием струи газа, ускоряющей эвакуацию расплава и способствующей необходимому для резки распределению вводимой тепловой энергии по толщине металла (газодуговые способы резки).

Для поверхностной обработки (термической строжки) металлов, в основном стали, получила распространение воздушно-дуговая резка. В специальных процессах (в основном при подводных работах) используют кислородно-дуговую резку. При этом плавящую дугу возбуждают трубчатым электродом, используя его канал, как сопло, формирующее режущую струю кислорода, а образующийся на торце «козырек», — как колокол, изолирующий разряд в воде. Качество реза, выполненного таким способом, невысоко. Все более широкое применение получают плазменные способы резки.

Плазменно-дуговая резка. Сущность способа состоит в проплавлении металла обрабатываемого объекта сжатой плазменной дугой и интенсивном удалении расплава струей плазмы. Поток плазмы получают в плазматронах. Корпус режущего плазматрона (рис. 13) содержит цилиндрическую дуговую камеру малого диаметра с выходным каналом, формирующим сжатую (плазменную) дугу. Для возбуждения плазмогенерирующей дуги служит электрод, располагаемый обычно в тыльной стороне дуговой камеры. Столб дуги ориентируется по оси формирующего канала и заполняет практически все его сечение.

В дуговую камеру подают рабочий газ (плазмообразующую среду). Газ, поступая в столб дуги, заполняющий формирующий канал, превращается в плазму. Вытекающий из сопла поток плазмы стабилизирует дуговой разряд. Газ и жесткие стенки формирующего канала ограничивают сечение столба дуги (сжимают его), что приводит к повышению температуры плазмы до 20 000—30 000° С. При этих температурах электрическая проводимость плазмы приближается к электропроводности металлического проводника. Скорость плазмы в струе, истекающей из сопла режущего плазматрона, может превышать 2—3 км/с.

Распределение температуры, проводимости, плотности и скорости течения плазмы по сечению столба в формирующем канале и вне его характеризуется высокими градиентами (рис. 14). Режущая дуга является концентрированным источником теплоты. Плотность энергии в формирующих соплах режущих плазматронов достигает 10^6 Вт/см^2.

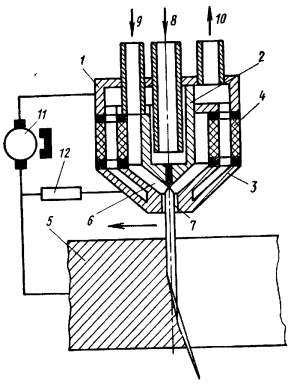


Рис. 13. Режущий плазматрон:

1 — корпус; *2* — электрод (катод); *3* — формирующий наконечник; *4* — изолятор; *5* — разрезаемый металл; *6* — дуговая камера; *7* — столб дуги; *8* — подача охлаждающей воды; *9* — подача рабочего газа; *10* — слив воды; *11* — источник тока; *12* — устройство зажигания дуги

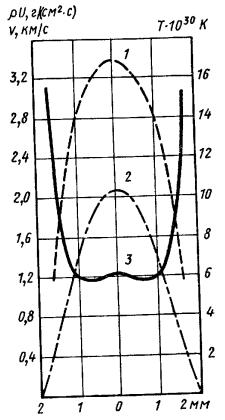


Рис. 14. Распределение температуры T (*1*), скорости течения азотной плазмы (*2*) и массового расхода ρU^2 (*3*) по сечению столба в формирующем канале плазматрона

В современной технике резки применяют две схемы плазмообразования (рис. 15). В первом случае используют дугу прямого действия, возбуждаемую на обрабатываемом металле, являющемся одним из электродов разряда. При этом используется энергия одного из приэлектродных пятен дуги и энергия плазмы столба и вытекающего из него факела. Поэтому резку по такой схеме называют плазменно-дуговой.

Во второй схеме, соответствующей косвенной (независимой) дуге, объект обработки не включают в электрическую цепь. Вторым электродом сжатой дуги в этом случае служит формирующий наконечник плазматрона. Поток плазмы совпадает со столбом дуги лишь внутри сопла, а вытекая из него, образует свободную струю плазмы. В этом случае энергия активных пятен и части столба поглощается стенками формирующего канала. Для резки используется только энергия плазменной струи (резка плазменной струей).

Энергетическая оценка обеих схем показывает, что плазменно-дуговую резку характеризует наиболее высокая эффективность, поскольку полезная мощ-

ность сжатой дуги реализуется в частях разряда, вынесенных за пределы наконечника. Поэтому для резки металлов, как правило, используют схему плазменно-дуговой резки. Этот вид плазменной резки наиболее распространен и его промышленное применение непрерывно расширяется. Плазменную струю применяют относительно редко, преимущественно для резки неметаллических материалов.

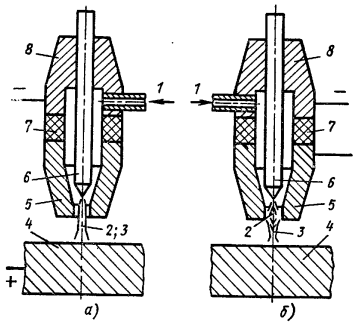


Рис. 15. Схемы плазмообразования:

а — плазменная дуга; *б* — плазменная струя; *1* — подача газа; *2* — дуга; *3* — струя плазмы; *4* — обрабатываемый металл; *5* — наконечник; *6* — катод; *7* — изолятор; *8* — катодный узел

При плазменно-дуговой резке наиболее эффективно используется энергия в режущей дуге постоянного тока прямой полярности (анод на металле). Этот способ применяют преимущественно для разделительных операций и, в значительно меньшей степени, для поверхностной обработки. Разделительная резка состоит в сквозном проплавлении металла по линии реза с целью вырезки деталей заданной конфигурации и получения отверстий или надрезов в заготовке. Поверхностная резка состоит в расплавлении и снятии с поверхности заготовки слоя металла заданной толщины.

Разделительная плазменно-дуговая резка. Резку выполняют равномерно с заданной скоростью, перемещая режущий плазматрон по заданной траектории над поверхностью разрезаемого металла. Струя плазмы выдувает расплавленный металл, а окружающий ее поток более холодного газа препятствует отклонениям дуги, заставляя ее проникать в толщу обрабатываемой детали. Сжатую дугу, обладающую такими свойствами, называют проникающей плазменной дугой. Ее анодное пятно, часть

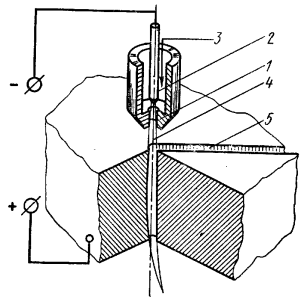


Рис. 16. Схема разделительной плазменно-дуговой резки:

1 — плазматрон (сопло); *2* — катод; *3* — подача газа; *4* — режущая дуга; *5* — выполненный рез

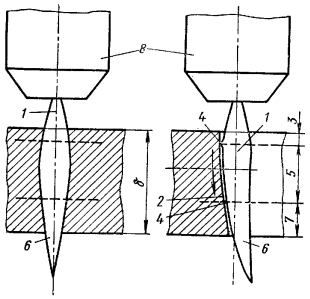


Рис. 17. Схема формирования реза:

1 — столб режущей дуги; *2* — лобовая поверхность реза; *3* — зона теплопередачи столба; *4* — анодное пятно; *5* — зона скольжения пятен; *6* — факел дуги; *7* — зона теплопередачи факела; *8* — плазматрон

столба и вытекающий из него факел плазмы по мере расплавления металла и формирования полости реза погружаются в нее (рис. 16).

В полости реза анодное пятно ориентируется на лобовой поверхности, непрерывно скользя от верхних кромок к нижним, где отмирает. Скольжению дуги сопутствуют процессы электрического пробоя изолирующего газового слоя в верхней части реза и шунтирования радиального участка столба. Электрический пробой происходит на некотором расстоянии от верхних кромок реза, а отмирание нижнего радиального участка дуги — на некотором расстоянии от нижних кромок (рис. 17).

В связи с этим энергетическое строение режущей проникающей дуги помимо наличия приэлектродных областей характеризуется неоднородностью столба разряда, в котором можно различить три зоны с различными условиями теплоотдачи: закрытый столб, сжатый столб и открытый столб. Анодная область, участок открытого столба и факел дуги являются режущими частями (рис. 18).

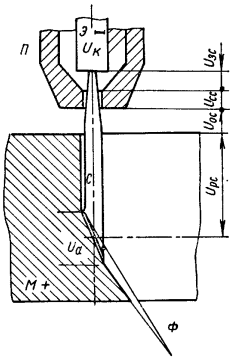


Рис. 18. Основные участки режущей дуги:

$U_{зс}$, $U_{сс}$, $U_{ос}$ $U_{рс}$ — напряжения участков столба соответственно закрытого, сжатого, открытого, режущего; $U_а$ и $U_к$ — анодное и катодное падения потенциала; *П* — плазматрон; *Э* — катод; *М* — разрезаемый металл; *Ф* — факел дуги

В полости реза существуют три характерных участка передачи энергии режущей дугой обрабатываемому металлу. В верхней части реза действует теплообменный источник — погруженный в образующуюся полость участок высокотемпературного столба дуги. На среднем участке наряду с теплопередачей от столба и факела тепловая энергия вводится преимущественно заряженными частицами, локализующими свою энергию в активном пятне разряда. В нижней части реза теплота вводится плазменным факелом, являющимся аналогично столбу теплообменным источником. По мере удаления от анодного пятна интенсивность теплового потока от факела снижается.

Форма и поперечные размеры реза определяются интенсивностью теплопередачи в каждом из сечений по глубине реза. В пределах участка действия столба ширина реза сохраняется практически постоянной. По мере перехода в область скольжения пятна ширина реза возрастает, достигает наибольшего значения, а затем, переходя в область действия факела, уменьшается.

Изменения ширины реза по его глубине сильно влияют на форму кромок реза, наблюдаемая неперпендикулярность которых является одним из показателей качества вырезаемых деталей и заготовок, определяемых ГОСТ 14792—69. Для получения наиболее благоприятной формы кромок резку нужно вести хорошо отлаженным плазматроном, исключающим отклонения режущей дуги от оси сопла, и при выборе режимов обеспечивать наибольшее возможное напряжение дуги.

От напряжения дуги U и рабочего тока I зависит режущая способность дуги, определяющая максимальную скорость v резки металла толщиной δ, плотностью γ и теплосодержанием S (при температуре плавления):

$$v=\frac{0{,}24\eta IU}{\gamma b\delta S},$$

где η — полный тепловой КПД процесса резки; b — ширина реза.

Напряжение режущей дуги определяется длиной и диаметром формирующего канала плазматрона, видом и расходом газа, толщиной металла, скоростью

резки, рабочим током и величиной зазора между соплом и металлом. С увеличением толщины разрезаемого металла напряжение возрастает. С уменьшением диаметра и увеличением длины канала, тока и расхода газа напряжение режущей дуги также возрастает в пределах, обеспечиваемых используемым источником тока. Напряжение дуги уменьшается с увеличением скорости резки.

Максимальной называют такую скорость резки, выше которой не может быть получено при заданных параметрах сквозное проплавление металла, необходимое для разделительной резки.

Важным показателем качества является обеспечение наименьших изменений металла у кромок реза. В соответствии с ГОСТ 14792—69 этот показатель оценивается глубиной зоны термического влияния (ЗТВ) резки, измеряемой у нижней кромки. Характер структурных изменений при этом зависит от свойств разрезаемого металла и связан с быстрым нагревом и последующим его охлаждением в зоне, прилегающей к резу.

Общая глубина ЗТВ уменьшается при увеличении скорости резки. Однако наиболее неблагоприятные изменения происходят в так называемом «литом» участке ЗТВ, содержащем не полностью удаленный с кромки расплавленный металл. Глубина литого участка уменьшается при снижении скорости резки конструкционной стали и других металлов, а также при резке дугой с высоким рабочим напряжением.

Плазмообразующие среды и параметры резки различных металлов. В качестве рабочих плазмообразующих сред при плазменно-дуговой резке используют азот, его смеси с водородом, кислород и его смеси с азотом, в особенности — сжатый воздух, иногда применяют гелий, углекислый газ, аммиак и воду. Рабочие среды должны обеспечивать:

эффективное преобразование и передачу разрезаемому металлу тепловой энергии, заимствованной в электрической дуге;

получение качественного металла на кромках реза;

обеспечение стойкости рабочего электрода плазматрона;

недефицитность применения, экономичность и безопасность работы;

получение дополнительной энергии за счет экзотермических реакций.

Многоатомные газы и пары воды при свойственных столбу дуги высоких температурах распадаются на атомы, вновь рекомбинирующие на поверхности реза и освобождающие энергию, заимствованную при диссоциации молекул. Наиболее высокие производительность и качество резки различных металлов получают, выполняя резку каждого из них с использованием соответствующих рабочих сред. Для резки алюминия наиболее подходят нейтральные газы (аргон, азот, их смеси с водородом). Эти среды обеспечивают получение наиболее высококачественных поверхностей. При резке других металлов применение рабочих сред на основе аргона неэкономично.

Для резки стали наиболее целесообразно применение кислородсодержащих газов, в особенности сжатого воздуха. В результате поглощения кислорода металлом на поверхности реза в стали происходит растворение кислорода, снижающее температуру ее плавления, и развиваются экзотермические реакции окисления железа, обеспечивающие дополнительный приток теплоты.

Наряду с этим расплавленный металл на кромках реза заметно насыщается другими газами, содержащимися в плазмообразующей и, отчасти, в окружающей среде. При этом может происходить выгорание легирующих элементов, заметное снижение их содержания у кромок и снижение прочностных, антикоррозионных и других свойств металла. Резка в водородсодержащих средах нередко сопровождается насыщением металла у кромок водородом. При воздушно-плазменной резке металл литого участка на кромках разрезаемой стали существенно насыщается азотом. Эти факты приводят к тому, что при последующей сварке таких кромок в сварных швах может возникать пористость.

Поскольку адсорбция газа при плазменно-дуговой резке происходит на поверхности металла, находящегося в жидкой фазе, и массоперенос его от поверхностного слоя происходит конвективным путем, все изменения концентрации

элементов имеют место в пределах литого участка ЗТВ. Поэтому для получения высококачественного металла на кромках нужно обеспечить наименьшую глубину литого участка, рационально выбрать рабочие среды и режимы резки.

14. Рабочие среды для плазменно-дуговой резки металлов

Рабочая среда	Обрабатываемый металл		
	Алюминий, медь и сплавы на их основе	Коррозионно-стойкая сталь	Углеродистая и низколегированная сталь
Сжатый воздух	Для заготовительной машинной резки	Для экономичной машинной и ручной резки	
Кислород	Не рекомендуется	—	Для машинной резки повышенного качества
Азотно-кислородная смесь		Для машинной резки с повышенной скоростью	
Азот	Для экономичной машинной и ручной резки	Для полуавтоматической и ручной резки	—
Азотно-водородная смесь			
Аргоно-водородная смесь	Для резки кромок повышенного качества	Не рекомендуется	

15. Ориентировочные режимы машинной резки углеродистой и низколегированной стали

Рабочий газ и расход, л/мин			Толщина, мм	Сила тока, А	Диаметр сопла, мм	Напряжение дуги, В	Скорость резки, м/мин	Ширина реза средняя, мм
Воздух	Кислород	Азот						
80—90	—	—	6	270—290	3	140—145	3,0—3,5	2,5—3,0
			10			145—150	2,2—2,5	
			20	290—310		165—170	1,0—1,2	3,0—4,0
			30			175—180	0,6—0,65	
			40			190—195	0,3—0,4	4,0—6,0
—	70—80		6	260—280		120—130	3,6—3,8	2,5—3,0
			10			125—135	2,4—2,7	
			20	280—300		135—145	1,1—1,3	3,0—3,5
			30			150—160	0,6—0,75	
			40			170—180	0,3—0,4	3,5—5,0
	60—75	20—25	10	500	5	70—75	2,5—2,7	4,0
			20			75—80	1,0—1,1	5,0
	45—60	15—20	30			80—85	0,5—0,7	6,0
	40—45	12—15	40			85—95	0,35—0,4	7,0

Примечание. Данные для воздуха и кислорода приведены для вихревого плазматрона и выпрямителя с напряжением холостого хода 300 В; для азотно-кислородной смеси — для аксиального плазматрона и блока сварочных преобразователей.

В табл. 14 приведены целесообразные рабочие среды, а в табл. 15—18 — ориентировочные режимы резки металлов средней толщины. При резке конструкционной стали для уменьшения поглощения азота целесообразны повышение напряжения дуги, использование анизотропии стабилизированной вихрем дуги (выбор левой или правой кромок) или замена воздуха кислородом и впрыскивание воды в количестве 0,25—0,3 л/мин.

16. Ориентировочные режимы машинной резки коррозионно-стойкой стали

Рабочий газ и расход, л/мин				Толщина, мм	Сила тока, А	Диаметр сопла, мм	Напряжение дуги, В	Скорость резки, м/мин	Ширина реза средняя, мм
Воздух	Кислород	Азот	Водород						
80—90	—	—	—	6 10	270—290	3	160—165 165—170	2,5—3,0 1,7—2,0	2,5—3,0
				20			180—185	1,0—1,2	3,0—4,0
				40	290—310		195—200	0,3—0,4	
—	60—75 45—60 38—45 12—15 12—15	20—25 15—20 12—15 12—15 12—15		10 20 30 40 50	500	5	75	4,6 2,75 0,9 0,55 0,45	3,0—3,5 4,0—5,0 5,5—6,5 7,0—8,0 7,5—8,5
				5	420	4		4,5	3,0
		25	25	10 20 35 50			100	2,6 1,1 0,4 0,3	4,0 5,0 6,0 7,0
	—	36—38 34—35		6 10	310—320 270—280	3	77—80 83—86	1,75—1,8 1,05—1,1	3,0—3,5 3,0—3,5
		30—32	—	20	255—265	4	94—96	0,6—0,65	4,0—4,5
		25—28		50 70	390—400 330—340	5	110—115 115—120	0,25—0,3 0,22—0,24	6,0—6,5 6,0—6,5

Примечание. Данные для воздуха и азота (толщина 50—70 мм) приведены для выпрямителя с напряжением холостого хода 300 В (воздушный плазматрон с вихревой стабилизацией), остальные данные — для аксиального плазматрона и блока сварочных преобразователей.

Резка малых толщин (до 5—10 мм) получила название микроплазменной. Она выполняется малыми токами с использованием плазматронов с малыми диаметрами сопл. Ориентировочные режимы микроплазменной резки приведены в табл. 19.

При криволинейной резке скорости снижают на 25—30%.

Воздушно-дуговая резка — способы образования разъема в обрабатываемом теле или снятия металла с его поверхности путем расплавления электрической дугой и удаления расплава струей сжатого воздуха. С этой целью обдуваемым воздушной струей электродом (обычно угольным или графитовым) с неизолированной поверхностью возбуждают дугу в точке начала реза, вводят электрод в образующуюся полость и продвигают с заданной скоростью в направлении резки.

Дуга при воздушно-дуговой резке отличается неустойчивостью, частыми обрывами и повторными зажиганиями. Электрод периодически касается лобовой поверхности реза. Металл, образующий контактные выступы, расплавляется.

17. Ориентировочные режимы машинной резки алюминия и сплавов на его основе

Рабочий газ и расход, л/мин				Толщина, мм	Сила тока, А	Диаметр сопла, мм	Напряжение дуги, В	Скорость резки, м/мин	Ширина реза средняя, мм
Воздух	Азот	Аргон	Водород						
80—90	—	—	—	6 10	270—290	3	140—145 145—150	4,0—5,0 3,0—3,5	3,5—4,0
				20 40	290—310		160—165 180—185	1,9—2,0 0,6—0,7	
—	9,5 8,0 2,5—8,0	—	3,5—5	5 10 15	450—600	5	80 80—85 85—90	9,6—9,9 5,8—6,2 3,4—3,6	2,5—3,0
	2,4—3,9			20 40			85—90 95—100	2,2—2,3 0,75—0,8	3,0—4,0
				80			110—115	0,38—0,45	4,5—5,5
	—	35—40	13—15	5	200—210	3	56—58	3,8—4,0	3,0—3,5
				10	180—190	4	59—60	1,3—1,4	
				20 40	260—280 190—200		82—84 92—95	1,3—1,4 0,35—0,4	4,0—4,5 5,0—5,5
		33	33	50 70	720	5	140	2,2 1,3	5,0—6,0
				125	680		160	0,54	7,5—8,5
				140	950	5,5	165	0,4	12—14

Примечание. Данные для воздуха и для аргоно-водородной смеси при толщине 50—140 мм приведены для плазматрона с вихревой стабилизацией дуги и выпрямителя с напряжением холостого хода 300 В, остальные данные — для аксиального плазматрона и сварочных преобразователей.

18. Ориентировочные режимы машинной резки меди и сплавов на ее основе

Рабочий газ и расход, л/мин		Толщина, мм	Сила тока, А	Диаметр сопла, мм	Напряжение дуги, В	Скорость резки, м/мин	Ширина реза средняя, мм
Воздух	Азот						
80—90	—	6 10	270—290	3	155—160 155—160	2,0—2,1 1,6—1,7	2,5—3,0
		20 40	290—310		170—175 190—195	0,8—0,9 0,15—0,2	
—	36—38	5	260—280	4	75—76	1,4—1,5	3,0—3,5
	30—32	16 20			92—94 95—96	0,65—0,7 0,55—0,6	4,0—4,5
	25—28	50 70		5	110—115 115—120	0,1—0,12 0,03—0,05	5,0—5,5

Примечание. Данные для воздуха приведены для плазматрона с вихревой стабилизацией дуги и выпрямителя с напряжением холостого хода 300 В.

19. Ориентировочные режимы машинной микроплазменной резки металлов

Разрезаемый металл и его толщина, мм	Рабочий газ и расход, л/мин		Сила тока, А	Диаметр сопла, мм	Напряжение дуги, В	Скорость резки, м/мин	Ширина реза, мм
	Азот	Воздух					
Углеродистая сталь Ст3:							
1—3		10	30	0,8	130	3,0—5,0	1,0—1,5
3—5	—	12	50	1,0	110	2,0—3,0	1,6—1,8
5—7		15	75	1,4		1,5—2,0	1,8—2,0
7—10			100		120	1,0—1,5	2,0—2,5
Коррозионно-стойкая сталь 12Х18Н10Т:							
0,7	3,5		20	1,0	120	0,95	1,5
2,0	2,5	—	18	0,6	90	0,9	0,9
3,0						0,7	
Алюминий и сплавы:							
1,0		7,0	20	0,8	130	4,0	1,1
1,5		7,5	25			3,0	1,2
3,0	—	8,5	50	1,0	100	2,8	1,6
5,0		13,5	70	1,4		2,7	1,75
10,0			100		105	1,6	2,0
Медь:							
2,0	3,0	—	30	0,8	110	0,5	1,6
2,0	—	8,5	50	1,0	120	1,0	
Латунь:							
1,5	3,5	—	30	1,0	130	0,9	1,3
Титан:							
5,0	—	13,5	100	1,4	95	2,6	1,6

Возникающая при разрывах контакта дуга сплавляет примыкающие участки металла. Расплавленный металл выбрасывается воздушной струей, которую подают из сопловых отверстий в резаке вдоль образующей электрода (рис. 19).

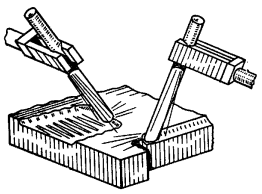


Рис. 19. Схема поверхностей воздушно-дуговой резки

Выделяющаяся при этом тепловая энергия распределяется между обрабатываемым металлом и электродом и частично теряется с воздушным потоком. Определяющее эффективность резки распределение энергии связано с родом обрабатываемого металла, родом, полярностью и величиной рабочего тока и со скоростью подачи электрода.

Наиболее рациональна воздушно-дуговая резка стали. Высокая производительность резки достигается при этом с использованием постоянного тока обратной полярности. С увеличением скорости подачи электрода производительность резки увеличивается. При этом разница в значениях производительности при разных полярностях постоянного тока или при использовании переменного тока снижается. При воздушно-дуговой резке цветных металлов и чугуна род тока и полярность дуги не имеют определяющего значения. Эти металлы обрабатываются хуже, чем сталь, поэтому их целесообразно резать

при максимальной мощности дуги и скоростях подачи электрода, используя постоянный или переменный ток.

Воздушно-дуговую резку выполняют цилиндрическими или пластинчатыми электродами. Эффективность воздушно-дуговой резки тем выше, чем меньше скорость износа электрода, который происходит в результате сублимации углерода в дуге и окисления его на боковой поверхности электрода. Наибольшей износостойкостью обладают электроды, изготовляемые из имеющего наиболее благоприятные свойства графита или его смесей. Боковые поверхности электродов покрывают защитно-разгружающими покрытиями из меди или композиций на основе алюминия.

Поскольку выполнение воздушно-дуговой резки связано с введением электрода в образующийся рез, его ширина зависит от диаметра или толщины электрода. Высокая производительность резки достигается при поперечных размерах электрода 6—12 мм. При этом сила тока составляет 300—1500 А, напряжение дуги 30—40 В, давление воздуха 4—7 кгс/см^2, расход воздуха 20—30 м^3/ч.

Воздушно-дуговую резку применяют преимущественно для поверхностной обработки, допуская ее использование в качестве разделительного процесса лишь в исключительных случаях. Типичные области применения воздушно-дуговой резки: подрубка корней, выплавление дефектных участков и снятие усилений сварных швов, обработка литья. В последнем случае успешно применяют пластинчатые угли. При поверхностной резке закрепленный в резаке электрод (рабочий вылет 100—120 мм) направляют под углом 30—45° в точку начала реза и, сохраняя его положение, перемещают по линии реза, углубив конец электрода в образующуюся канавку. Проносящийся вдоль электрода воздушный поток выбрасывает выплавляемый металл вперед и частично в стороны. Вдоль кромок канавки может откладываться небольшое количество застывших шлаков, легко удаляемых по окончании резки. Ориентировочные данные о поверхностной воздушно-дуговой резке приведены в табл. 20.

20. Ориентировочные режимы поверхностной воздушно-дуговой резки стали (постоянный ток, обратная полярность)

Диаметр или сечение электрода, мм	Сила тока, А	Интенсивность выплавления стали, кг/ч	
		углеродистой	легированной
6,0	280	9,5	12,3
8,0	380	12,9	16,7
10,0	500	15,5	20,1
12,0	600	16,4	21,4
15,0×8,0	800	23,0	—
30,0×10,0	1000	30,0	

Примечание. Расход воздуха 20—30 м^3/ч.

Качество поверхности реза и прилегающего к ней металла после воздушно-дуговой резки стали удовлетворительное. Однако в поверхностном слое глубиной 0,1—0,3 мм может наблюдаться заметное повышение содержания углерода, в связи с чем могут появиться трещины. Для уменьшения науглероживания следует избегать возбуждения дуги без воздуха, не касаться электродом раскаленного металла, не выплавлять слишком глубокие канавки. Качество поверхности реза алюминия, меди, титана невысокое. Поэтому во всех случаях после воздушно-дуговой резки необходимо выполнять тщательную зачистку поверхностей стальной щеткой до металлического блеска и производить осмотр для установления отсутствия поверхностных дефектов. В наиболее ответственных случаях поверхностный слой снимают шлифованием на глубину до 0,5 мм.

До настоящего времени воздушно-дуговую резку применяют как ручной процесс. Однако в СССР и за рубежом выполнены работы по механизации воздушно-дуговой резки и созданы механизированные аппараты. Эти работы показывают несомненную целесообразность и перспективность механизации воздушно-дуговой резки, так как достигаются высокие качество и эффективность обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аитонов И. А.** Газопламенная обработка металлов. М., «Машиностроение», 1976, 264 с.
2. **Васильев К. В.** Газоэлектрическая резка металлов. М., Машгиз, 1963, 174 с.
3. **Васильев К. В.** Плазменно-дуговая резка. М., «Машиностроение», 1974, 111 с.
4. **Головченко В. С., Доброленский В. Р., Мисюров И. П.** Тепловая резка металлов в судостроении. Л., «Судостроение», 1975, 272 с.
5. **Евсеев Г. Б., Глизманенко Д. Л.** Оборудование и технология газопламенной обработки металлов и неметаллических материалов. М., «Машиностроение», 1974, 308 с.
6. **Плазменные** процессы в металлургии и технологии неорганических материалов. Сборник к 70-летию акад. Н. Н. Рыкалина. Под ред. акад. Б. Е. Патона. М., «Наука», 1973, 243 с.
7. **Рыкалин Н. Н.** Расчеты тепловых процессов при сварке М., Машгиз, 1951, 296 с.
8. **Эсибян Э. М.** Плазменно-дуговая аппаратура. Киев, «Техника», 1971, 164 с.

Глава 9
СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ СВАРКИ

СВАРКА ДАВЛЕНИЕМ

В течение последнего десятилетия в СССР и за рубежом получили широкое развитие разнообразные способы сварки в твердой фазе: термокомпрессионная, диффузионная, трением, ультразвуковая, клинопрессовая, индукционная, холодная, взрывом, магнитно-импульсная и др. Этому способствовали, с одной стороны, разработка теоретических основ сварки в твердой фазе (1965—1972 гг.) и, с другой стороны, быстрый прогресс электронной техники, точного приборостроения и средств автоматизации.

Способами сварки в твердой фазе (рис. 1) можно соединять практически любые металлические сплавы в однородном и разнородном сочетаниях, металлы с полупроводниками и керамиками, пластмассы и т. д. Чем выше степень локализации пластической деформации в зоне соединения, тем эффективнее способы сварки в твердой фазе обеспечивают точность размеров изделий, сохранение механических и специальных свойств свариваемых материалов и тем легче они позволяют соединять хрупкие материалы, особенно в разнородных сочетаниях.

При любых способах сварки в твердом состоянии соединение образуется в результате деформационного или термодеформационного воздействия на соединяемые материалы в зоне контакта. Независимо от характера и интенсивности этого воздействия природа образования соединения едина. Различия заключаются в кинетике протекания отдельных стадий процесса, которая определяется условиями нагрева, характером и интенсивностью деформации материалов, степенью локализации деформации и особенностями развития релаксационных процессов в приконтактной зоне.

С позиций теории твердофазных топохимических реакций процесс образования соединения при всех способах сварки в твердой фазе протекает в три основные стадии [15, 29, 9].

1. Образование физического контакта, т. е. сближение атомов соединяемых материалов на расстояние, при котором возникает физическое взаимодействие (обусловленное дисперсионными силами типа Ван-дер-Ваальса), или расстояние, при котором возможно слабое химическое взаимодействие. Это осуществляется за счет пластической деформации обоих (при соединении одноименных или близких по сопротивляемости пластическому деформированию) или более мягкого из соединяемых материалов. Расчеты кинетики стадии образования физического контакта разработаны для процессов сварки с низкоинтенсивным силовым воздействием типа термокомпрессионной и диффузионной, для которых эта стадия достаточно продолжительна. Эти расчеты основаны на анализе смятия микровыступов на поверхностях соединяемых материалов за счет ползучести с учетом степени чистоты механической обработки поверхностей и изменения истинного напряжения по мере деформации микровыступов.

2. Активация контактных поверхностей (образование активных центров). При сварке одноименных материалов активация контактных поверхностей происходит одновременно с образованием физического контакта в процессе их сближения при смятии отдельных микровыступов за счет пластической деформации. При сварке разноименных материалов на этой стадии для образования соединения необходимо дополнительное время для образования активных центров на поверхности более твердого из соединяемых материалов.

Теория активных центров предусматривает, с одной стороны, дискретность процесса образования очагов взаимодействия (активных центров), а с другой стороны, коллективность взаимодействия атомов в поле активных центров.

В общем случае активными центрами или очагами взаимодействия являются поля упругих искажений кристаллической решетки, образующиеся на поверхностях соединяемых материалов в процессе упругопластической деформации. Однако для образования активных центров совсем не обязательно, чтобы приповерхностные слои обеих соединяемых поверхностей подвергались пластической деформации. Например, при соединении разнородных материалов с резко различной сопротивляемостью пластической деформации, таких как алюминий и кремний, в условиях термокомпрессионной и ультразвуковой сварки поверхность кремния при определенных параметрах режима не имеет следов пластической деформации в виде дислокаций и полос скольжения. В этом случае активными центрами на кремнии являются чисто упругие искажения, возникающие либо вследствие царапания деформационными микровыступами алюминия, либо в результате воздействия ультразвукового поля. При сварке одноименных металлов и сплавов, а также разнородных материалов с не слишком большой разницей в механических свойствах активные центры образуются, как правило, в местах выхода дислокаций и их скоплений в зону контакта. Исследования экзоэлектронной эмиссии с поверхности твердых тел в процессе их пластической деформации показывают, что интенсивность эмиссии электронов в существенной мере зависит не только от уровня микронапряжений в поле упругих искажений, но и от плотности потока вакансий, для которых места выхода дислокаций служат интенсивными стоками. Это подтверждает мнение о значительной роли точечных дефектов в процессе активации контактных поверхностей при сварке в твердой фазе, особенно на релаксационной стадии взаимодействия.

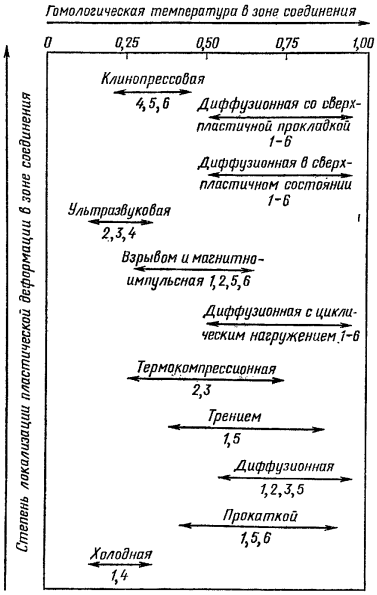


Рис. 1. Классификация способов сварки в твердой фазе по степени локализации пластической деформации и гомологической температуре ($T/T_{пл}$) в зоне соединения. Цифрами указаны наиболее распространенные области применения [27]:

1 — машиностроение; *2* — точное приборостроение; *3* — электронная техника; *4* — электротехника; *5* — самолетостроение и космическая техника; *6* — химическое и нефтяное машиностроение

Поверхности твердых тел в атмосферных условиях, как правило, инертны, так как валентности их атомов насыщены связью с атомами окружающей среды. Даже в отсутствие окисных пленок, например, в условиях диффузионной сварки в вакууме, когда они у большинства металлов диссоциируют или растворяются, на поверхностях имеется хемосорбированный слой. Несмотря на ионную природу, связь между адсорбированным кислородом и атомами металла на его поверхности сильнее связи кислорода с металлом в окисле того же стехиометрического состава. Так как величина теплоты адсорбции в большинстве случаев выше теплоты образования окисла, связь металл—кислород в комплексе хемосорбции энергетически более стабильна, чем связь металл—кислород в окисле. Это различие в стабильности оказывается решающим при оценке роли активных центров в процессе образования соединения при сварке в твердом состоянии. Даже при разрушении твердых тел в глубоком вакууме комплексы хемосорбции образуются за весьма короткое время вследствие сегрегации примесных атомов на поверхности путем диффузии из прилегающих объемов тела. В этом смысле понятие ювенильных поверхностей весьма условно. Акт активации поверхностных атомов можно представить как процесс разрыва насыщенных связей, приводящий к появлению неспаренных электронов (радикалов), способных участвовать в химическом взаимодействии. Следовательно, для развития в зоне контакта соединяемых материалов процессов электронного взаимодействия требуется определенная величина энергии для активации поверхностей. Такая энергия может сообщаться в виде теплоты (термическая активация), упругопластической деформации (механическая активация), электронного, ионного и других видов облучения (радиационная активация).

При сварке металлов с металлоидами химическими соединениями металлов, в частности окислами, а также с полупроводниками или интерметаллидами, обладающими полупроводниковыми свойствами, квантовые процессы сводятся к образованию прочных связей в основном ковалентного типа. Когда соединяемые вещества обладают способностью к донорно-акцепторному взаимодействию, устанавливается координационно-ковалентная связь. Примерами таких веществ могут служить основные окислы (доноры) и кислые окислы (акцепторы). При непосредственном соединении металлов с керамиками, в состав которых входят кислые окислы, координационно-ковалентная связь наиболее легко образуется в том случае, если на поверхности металла создан тонкий слой низших основных окислов, обладающих ярко выраженными донорными свойствами. Координационно-ковалентная связь не является единственным типом связи, обусловливающей образование прочного соединения металла с другими веществами. Возможно также образование парноэлектронной связи вследствие переключения (трансляции) валентных связей.

Длительность стадии активации принято оценивать на основе термофлуктуационных уравнений теории абсолютных скоростей реакций, учитывающих вклад в энергию активации процесса не только температуры, но и напряжений [28,9].

3. Объемное взаимодействие. Эта стадия наступает с момента образования активных центров на соединяемых поверхностях. В течение этой стадии происходит развитие взаимодействия соединяемых материалов на активных центрах как в плоскости контакта с образованием прочных химических связей, так и в объеме зоны контакта. В плоскости контакта этот процесс заканчивается слиянием дискретных очагов взаимодействия, а в объеме — релаксацией напряжений (в той степени, которая необходима для сохранения образовавшихся связей). Однако для обеспечения требуемой прочности соединения в целом часто необходимо дальнейшее развитие релаксационных процессов типа рекристаллизации или гетеродиффузии в допустимых пределах. При сварке одноименных металлов критерием окончания третьей стадии и образования качественного соединения может служить длительность, необходимая для образования общих зерен в зоне контакта за счет собирательной рекристаллизации или рекристаллизации обработки. При сварке разноименных материалов необходимость развития или ограничения гетеродиффузии определяется физико-химическими свойствами диффузионной зоны и образующихся в ней фаз.

Таким образом, при всех способах сварки в твердой фазе пластическая деформация является основным процессом, определяющим развитие первых двух

стадий образования соединения — физического контакта и активации контактных поверхностей, причем длительность процесса образования прочных связей по всей площади взаимодействия определяется частотой выхода дислокации в зону физического контакта, т. е. не только необходимой для этого величиной накопленной деформации, но и ее скоростью.

Степень развития третьей стадии процесса (релаксация напряжений, рекристаллизация, гетеродиффузия) определяется главным образом температурой в зоне соединения, однако накопленная пластическая деформация и ее скорость могут также оказывать существенное влияние на интенсивность протекания релаксационных процессов и определять их механизм. Например, при сварке однородных металлов в режимах интенсивной пластической деформации при относительно невысоких температурах образование общих зерен в зоне соединения может происходить и по механизму рекристаллизации обработки, а при малоинтенсивной деформации и высоких температурах — только по механизму собирательной рекристаллизации. Скорость пластической деформации может менять механизм гетеродиффузии. Например в работе [4] было показано, что при ударной сварке разнородных металлов в твердом состоянии в вакууме со скоростью соударения порядка десятков метров в секунду скорости гетеродиффузии могут быть даже выше, чем в жидком состоянии, что было объяснено образованием высоких неравновесных концентраций дислоцированных атомов. Обычными механизмами диффузии по вакансиям этот факт объяснить нельзя.

По своей физико-химической природе схватывание поверхностей твердых тел в условиях глубокого вакуума является частным случаем процесса образования соединения материалов при сварке в твердой фазе.

В связи с определяющей ролью пластической деформации в процессе образования соединения (схватывания) металлов в твердом состоянии представляет особый интерес рассмотрение возможных причин активирующего влияния глубокого вакуума (наряду с температурой и приложенным давлением) как одного из факторов, облегчающих пластическую деформацию в металлах и ослабляющего прочность связей в окислах и химически адсорбированных слоях, существующих на соединяемых поверхностях. К этим причинам следует отнести резкое снижение температуры диссоциации и испарения окислов (для большинства металлов, за исключением алюминия, магния, тория и т. п., это происходит уже при вакууме около 10^{-8} мм рт. ст.); десорбцию примесей внедрения; изменение величины поверхностной энергии. Все это значительно облегчает условия гетерогенного зарождения дислокаций вблизи поверхности (снижение критического сопротивления сдвигу и энергии образования и движения дислокаций) и их выхода к поверхности (снижение сил зеркального изображения). В результате этого с увеличением степени вакуума температура и давление, необходимые для схватывания, значительно снижаются. Особого внимания заслуживает анализ влияния дегазации металла, так как снижение концентрации примесей внедрения существенно, но неодинаково интенсифицирует пластическую деформацию при известных ее механизмах (поперечное скольжение, пороговая ползучесть, непороговая или диффузионная ползучесть). В частности, вследствие десорбции газовых примесей и периодической блокировки ими дислокаций и последующей деблокировки наблюдается ступенчатое развитие деформации ползучести в зоне контакта [30].

С изложенных выше позиций теории трехстадийности процесса соединения легко объяснить наблюдаемые экспериментальные факты и явления. В частности, при сварке с высокоинтенсивным силовым воздействием (сварка взрывом, магнитно-импульсная сварка, холодная сварка и др.), ввиду того, что скорость и величина пластической деформации соединяемых материалов в приконтактной зоне велики, атомы в состоянии физического контакта вступают уже энергетически подготовленными для образования химических связей.

При магнитно-импульсной сварке и сварке взрывом в ряде случаев даже необходимо ограничивать величину и скорость пластической деформации в приконтактной зоне, так как образуются оплавленные участки металла. Возможность образования соединения и его прочность при сварке с высокоинтенсивным силовым воздействием часто определяются условиями релаксации напряжений в приконтактной зоне.

При сварке с низкоинтенсивным силовым воздействием (диффузионная сварка, сварка давлением с подогревом, термокомпрессионная сварка) скорость пластической деформации материала мала, и для получения качественного соединения требуются десятки минут. В этом случае пластическую деформацию, наоборот, необходимо интенсифицировать, чтобы сделать процесс более производительным. Кинетический подход к анализу процесса образования соединения материалов в твердой фазе позволил наметить пути интенсификации способов сварки с низкоинтенсивным силовым воздействием и, наоборот, так ограничивать параметры импульсных способов сварки, чтобы не происходило образования оплавленных участков металла в зоне контакта. Эти пути дальнейшего совершенствования технологии сварки сочетаются с новыми подходами к разработке высокопроизводительного сварочного оборудования.

Сопоставление кинетики развития пластической деформации соединяемых материалов с кинетикой роста прочности соединений, полученных при сварке металлов различной природы в одноименном и разноименном сочетаниях, показывает, что наиболее интенсивный рост прочности соединения происходит за период активного деформирования и этап неустановившейся ползучести. На этапе установившейся ползучести интенсивность процессов развития физического контакта и образования химических (металлических) связей снижается в соответствии с уменьшением скорости деформации. Следовательно, если в процессе образования соединения любым способом инициировать интенсивную пластическую деформацию соединяемых материалов, то должен наблюдаться и интенсивный рост прочности соединения. При сварке давлением с подогревом с ограниченной пластической деформацией, т. е. в условиях диффузионной сварки, интенсифицировать развитие деформации соединяемых материалов можно путем скачкообразного увеличения температуры или давления или путем импульсного воздействия давления.

Одним из наиболее существенных недостатков сварки давлением с подогревом, например диффузионной, является длительность процесса, обусловленная медленным развитием деформации по схеме ползучести вследствие интенсивного развития деформационного упрочнения металла в приконтактном объеме. В связи с этим перспективным является новый способ сварки с циклическим приложением давления, позволяющий использовать наиболее эффективные стадии развития пластической деформации (стадии активной деформации и неустановившейся ползучести). Эффект циклического воздействия сварочного давления при высокой температуре ($\geqslant 0{,}5\ T_{пл}$, см. рис. 1) обусловлен тем, что в течение разгрузки и паузы интенсивно протекают процессы возврата, т. е. устраняются барьеры, препятствующие дальнейшему развитию пластической деформации в приконтактном объеме. Каждое последующее нагружение вновь инициирует активную пластическую деформацию. При этом появляется возможность существенного снижения температуры процесса, что способствует повышению свойств соединения как за счет наиболее совершенной тонкой структуры металла, так и за счет ограничения возможности образования промежуточных хрупких фаз.

Другим, также перспективным способом интенсификации процесса сварки давлением с подогревом является циклическое повышение температуры сварки, способствующее ускорению процесса возврата и рекристаллизации.

Широкие возможности для сварки металлов в твердой фазе открывает использование явления сверхпластичности. При этом сварку металлов, претерпевающих фазовые превращения (например, титана, железа, циркония или их сплавов), осуществляют в области температур фазовых превращений и при скоростях деформации 10^{-3}—10^{-4} $с^{-1}$, обеспечивающих сверхпластичность. Сварку сплавов с гетерофазной структурой ведут при скоростях деформации этого по-

рядка при соответствующих температурах. Сверхпластичность позволяет снизить в несколько раз, а иногда на порядок, требуемые усилия и особенно резко длительность процесса сварки (на два порядка) [16].

Для некоторых конструкций и широкого класса однородных и разнородных материалов (металлы с металлами, с полупроводниками и керамикой, керамика с керамикой и т. д.) перспективно использовать промежуточные прокладки из материалов, обладающих высокими и сверхпластичными свойствами при выбранных режимах сварки. Здесь эффект достигается за счет локализации пластической деформации и интенсификации сил контактного трения. Кроме того, эти прокладки могут служить в качестве барьерных слоев, предупреждающих неблагоприятный характер физико-химического взаимодействия соединяемых материалов. Существенному снижению температуры и давления при сварке способствует помещение в зону контакта тонкодисперсных (< 200—500 Å) активных порошков металлов благодаря их высокой поверхностной энергии.

При известных в настоящее время способах сварки давлением с подогревом для упрочнения сварного соединения необходимо проведение последующей термической или термопластической обработки. Однако рациональное ведение сварки с резким увеличением скорости деформации на конечном этапе процесса до значений, при которых происходит эффективное скоростное деформационное упрочнение, позволяет непосредственно в процессе сварки осуществлять субструктурное упрочнение и обеспечивать высокий уровень сопротивляемости хрупкому разрушению сварных соединений.

Для соединения в твердой фазе труднодеформируемых хрупких материалов процесс сварки давлением целесообразно осуществлять по схеме гидроэкструзии, т. е. в условиях воздействия на свариваемые материалы всестороннего сжатия, достаточного по своей величине для перевода соединяемых материалов в пластическое состояние.

Существующие стандартные установки для сварки в твердой фазе давлением с подогревом имеют системы создания сварочного давления, которые не учитывают скоростного фактора приложения нагрузки. В них скорость нагружения устанавливается независимо от релаксационных характеристик свариваемого материала и целиком определяется характеристикой только механизма нагружения. Однако на процесс соединения в твердой фазе основное влияние оказывают величина сопротивления деформации свариваемых материалов и их релаксационные свойства, определяющие интенсивность процессов возврата.

Поэтому установки для сварки в твердой фазе давлением с подогревом должны содержать узлы, обеспечивающие установление и автоматическое регулирование параметров процесса в зависимости от сопротивления пластической деформации и релаксационных свойств соединяемых материалов. Уже созданы опытные образцы установок, которые снабжены высокоточными системами измерения сопротивления и степени пластической деформации свариваемых деталей, и главное — механизмами создания сварочного давления, регулирующими в процессе сварки в широком диапазоне либо скорость нагружения при циклическом приложении нагрузки, либо скорость вынужденной деформации в соответствии с релаксационными характеристиками свариваемых материалов. На этих установках, в частности, можно осуществлять сварку в режиме сверхпластичности, а также формировать механические свойства сварных соединений на основе новейших достижений термомеханической обработки.

Для термокомпрессионной и ультразвуковой сварки в микроэлектронике разработаны соответствующие установки с программированным нагружением и автоматическим контролем качества сварных соединений.

В последние годы для изготовления алюминиево-стальных трубных переходников широко используется клинопрессовый (теплопрессовый) способ сварки. Этот способ сварки заключается в нагреве соединяемых деталей на воздухе или в защитной среде и последующем впрессовывании стальной детали в алюминиевую. При этом рабочая часть стальной детали, как правило, затачивается на

некоторый угол. Последующей механической обработкой сварных заготовок получают алюминиево-стальные переходники разнообразной формы и размеров. Такие переходники позволяют широко внедрять в конструкциях летательных аппаратов легкие алюминиевые трубопроводы, так как они обладают всеми преимуществами как алюминиевых, так и стальных конструкций (высокая удельная прочность стали и коррозионная стойкость сплавов алюминия и возможность осуществления сварки и многоразового монтажа при сохранении герметичности изделий из стали). Благодаря высокой степени локализации пластической деформации в приконтактной зоне этот перспективный способ сварки позволяет получать прочное соединение при нагреве свариваемых материалов до температур ниже температур рекристаллизации более твердого материала. В последнее время показано, что этим способом можно сваривать также и сталь со сплавами титана и меди. В этом отношении способ клинопрессовой сварки имеет ряд неоспоримых преимуществ перед сваркой трением [8].

В последнее время процессы соединения разнородных материалов в твердой фазе получили применение при изготовлении композиционных материалов, например слоистых и с волокнистым и сеточным упрочнением. К этим процессам относятся сварка взрывом, прокаткой, вакуумная диффузионная и термокомпрессионная сварка пакетов фольг из матричного материала и слоев сеток и волокон и ленточных полуфабрикатов, полученных в виде тонких листов, состоящих из рядов волокон, на которые методом плазменного напыления нанесен матричный материал. В связи с этим одной из важнейших современных проблем становится сварка самих композиционных материалов.

Большие технологические возможности имеет сварка взрывом. Сваркой взрывом соединяют самые разнообразные (компактные и порошковые) материалы в однородном и разнородном сочетаниях, а также осуществляют сложное формоизменение [17].

Характерной особенностью сварки взрывом является многообразие схем ее осуществления в зависимости от природы соединяемых материалов, формы их существования (компактные или порошковые), конфигурации изделия и т. д. Основными дефектами при сварке взрывом являются дискретно расположенные вдоль границы соединения оплавленные участки, снижающие, например, коррозионную стойкость зоны соединения. Изложенные ранее представления о природе образования соединения металлов в твердом состоянии, а также существующие в настоящее время расчетные модели позволяют оценивать параметры процесса сварки взрывом, при которых сварное соединение характеризуется высокой прочностью и отсутствием локальных оплавленных участков металла. Эти расчеты основаны на учете скорости движения дислокаций, частоты их выхода в зону соединения, энергии, выносимой каждой дислокацией, и энергетического барьера в пределах отдельного активного центра, при достижении или превышении которого осуществляется элементарный акт взаимодействия (образование химических связей). Использование такого подхода позволяет существенно сократить объем экспериментальных исследований, а в ряде случаев прогнозировать выбор материалов конкретного изделия.

Среди способов сварки импульсным воздействием следует особо выделить магнитно-импульсную сварку — разновидность сварки взрывом. При магнитно-импульсной сварке соударение свариваемых деталей обеспечивается импульсным магнитным полем от разряда батарей конденсаторов. Длительности импульса и скорости соударения при этом методе сварки того же порядка, что и при сварке взрывом. Магнитно-импульсная сварка обладает тем преимуществом по сравнению со сваркой взрывом, что ее параметры более легко управляемы и ее применение возможно в любых цеховых условиях. Она особенно целесообразна в тех случаях, когда необходимо сохранение структуры и механических свойств материала в зоне сварного соединения на уровне, близком к исходному. Этим методом можно сваривать, например, внахлестку трубы из разнородных материалов: алюминий — медь, алюминий — коррозионно-стойкая сталь, цирконий — нержавеющая сталь и т. п.

ХОЛОДНАЯ СВАРКА

Холодная сварка — один из видов сварки в твердой фазе со значительной объемной пластической деформацией и малой степенью ее локализации в зоне контакта соединяемых материалов. Ее осуществляют давлением на воздухе при комнатной температуре, которая для большинства металлов значительно ниже температуры рекристаллизации обработки. Основной технологический вариант холодной сварки предусматривает совместную пластическую деформацию соединяемых деталей за счет приложения сил, нормальных к поверхности соединения. Иногда для интенсификации и облегчения относительных смещений соединяемых поверхностей дополнительно прилагают тангенциальные усилия [26, 3].

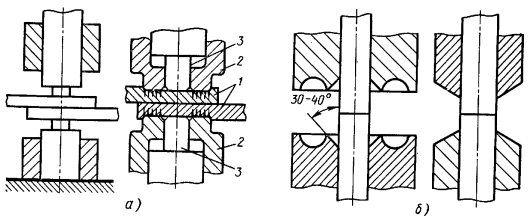


Рис. 2. Схемы холодной сварки усилиями, нормальными к поверхности соединения:

а — внахлестку без зажатия и с зажатием свариваемых деталей перед сваркой; *б* — встык с зажимами, ограничивающими деформацию в большей или меньшей степени; *1* — свариваемые детали; *2* — прижимы; *3* — пуансоны [3]

Холодную сварку нормальными усилиями осуществляют внахлестку вдавливанием пуансонов в предварительно зажатые или незажатые детали или встык с использованием зажимных приспособлений, которые приводят к стесненной деформации в конце процесса (рис. 2). Для получения качественного соединения в обоих случаях необходимо значительное растекание металла в месте соединения, которое способствует разрушению и выносу окисных пленок из зоны контакта, сглаживанию поверхностных микронеровностей и образованию активных центров схватывания в местах выхода дислокаций и их скоплений.

1. Степень относительной деформации ε_{min} при холодной сварке внахлестку металлов толщиной 1 мм вдавливанием круглых пуансонов диаметром 5 мм [3]

Металл	Подготовка поверхности образцов	ε_{min}, %
Индий	Очистка тонкой проволочной щеткой	10
Золото	Отжиг без дополнительной очистки	35
Серебро	Отжиг, очистка тонкой проволочной щеткой	50
Свинец	Очистка тонкой проволочной щеткой	55
Алюминий	Наклепанный, очистка тонкой проволочной щеткой	67
Олово	Очистка шабером	86
Медь	Отжиг, очистка грубой проволочной щеткой	90
Железо		81
Низкоуглеродистая сталь		84

При сварке внахлестку круглыми пуансонами степень растекания ε_p металла зависит от соотношения диаметра пуансона d и толщины листа δ. При измерении на базе 0,5 мм в центре под пуансоном максимум растекания соответствует $d/\delta = 2$ при любой степени вдавливания пуансона (в пределах 60—80% от толщины листа). При применении прямоугольных пуансонов максимальное растекание наблюдается при $B/\delta = 1$ (здесь B — ширина пуансона). В этих условиях относительная степень растекания для всех металлов весьма значительна (рис. .3).

Измерение относительной степени растекания металла в зоне соединения трудоемко. Поэтому для оценки деформации, достаточной для образования прочного соединения, пользуются относительной глубиной вдавливания пуансона $\varepsilon_{min} = h/\delta$ (рис. 4). Однако ε_p более точно определяет условия сварки, чем ε_{min}. Следует учитывать, что корреляция между этими параметрами наблюдается только при неизменном соотношении размеров пуансона и толщины металла. Величина ε_{min} существенно зависит от рода металла, способа подготовки поверхности и геометрии пуансонов (табл. 1 и 2).

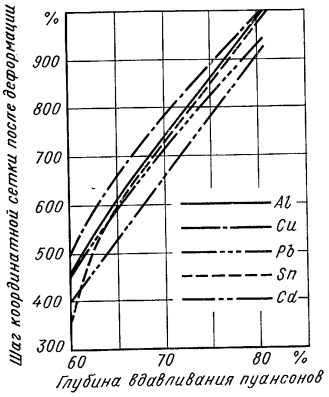


Рис. 3. Влияние глубины вдавливания пуансона на степень растекания различных металлов в плоскости соединения при холодной сварке внахлестку (ширина пуансона 4 мм, исходный шаг координатной сетки 0,5 мм) [3]

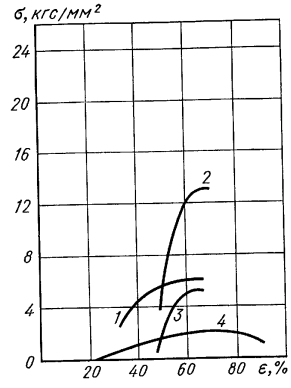


Рис. 4. Влияние относительной степени вдавливания пуансона на прочность соединения металлов при холодной сварке:

1 — алюминий в наклепанном состоянии; *2* — электролитическая медь; *3* — алюминий в отожженном состоянии; *4* — олово [3]

Предварительный наклеп свариваемых металлов снижает ε_{min} в среднем на 3—5% (см. рис. 3), что можно связать с увеличением плотности подвижных дислокаций в процессах последующей сварки. Такое же примерно влияние оказывает появление или приложение тангенциальных усилий, облегчающих условия растекания металла и локализующих деформацию в зоне соединения.

Холодную сварку применяют также и для соединения разнородных металлов. Примерами могут служить: армирование алюминиевых проводов медными наконечниками; получение двух- и многослойного проката из лент, которые, проходя через зачистную машину, поступают в валки прокатного стана и сва-

риваются с обжатием до 65% (никель — низкоуглеродистая сталь — никель, алюминий — железо — алюминий, медь — алюминий — медь, серебро — бронза — серебро, сереброникельмедный сплав и т. д.).

2. Степень относительной деформации ε_{min} при сварке симметрично наклоненными прямоугольными пуансонами, ширина которых равна толщине металла [3]

Металл	ε_{min}, %, при толщине металла, мм			Металл	ε_{min}, %, при толщине металла, мм		
	3	2	1		3	2	1
Алюминий	57,1	—	—	Олово	88,4	87,3	86,9
Свинец	62,2			Никель	90,0	—	81,0
Медь	81,0		77,3	Цинк	91,8		—

Для получения качественного соединения между разнородными металлами также необходима значительная совместная пластическая деформация. При этом лимитировать процесс сварки должна величина ε_p для более твердого из соединяемых металлов. В этом случае величина ε_{min} менее точно отражает физические условия сварки, так как в первую очередь характеризует деформацию более мягкого материала.

Для осуществления холодной сварки, как правило, используют стандартное прессовое и прокатное оборудование, которое оснащают специальным инструментом в соответствии с типоразмерами свариваемых деталей. Наиболее широкое применение холодная сварка нашла в производстве изделий домашнего обихода из алюминия и его сплавов, в электротехнической промышленности и транспорте для соединения алюминиевых и медных проводов, а также алюминиевых проводов с медными наконечниками. В последние годы во ВНИИЭСО, ЦНИИ МПС и ряде других организаций для этих целей были разработаны образцы специализированного прессового оборудования, позволяющего, в частности, осуществлять сварку с комбинированным приложением нормальных и тангенциальных усилий.

Для понимания физической природы холодной сварки и выявлений условий совместной пластической деформации, достаточных для получения качественного соединения различных металлов и сплавов, необходимо рассмотреть роль и особенности пластической деформации на всех основных стадиях процесса при образовании физического контакта (разрушение и удаление окисных пленок из зоны соединения, сглаживание поверхностных микронеровностей); активации контактных поверхностей (формирование активных центров в местах выхода дислокаций в зону контакта); объемном взаимодействии (образование мостиков схватывания на активных центрах, релаксация напряжений).

В связи с трудностью обеспечения схватывания металлов по всей поверхности контакта при холодной сварке реальную прочность соединения необходимо оценивать также с учетом влияния концентраторов напряжений от остающихся несплошностей (дефектов сварки) на разрушение мостиков схватывания при температурах, при которых у ряда металлов может проявляться хрупкость.

Холодная сварка осуществляется при низких гомологических температурах ($< 0{,}4\ T_{пл}$), для которых характерны только низкотемпературные механизмы возврата в процессе упругопластической деформации и после снятия нагрузки (разрядка дислокаций в скоплениях за счет сильного упругого взаимодействия дислокаций, аннигиляция дислокаций и взаимодействие их с точечными дефектами типа отжига вакансий на дислокациях, но без перестройки дислокаций по механизму переползания их винтовых и краевых компонент). Чем выше энергия дефектов упаковки кристаллической решетки (например, в ГЦК-металлах у алюминия по сравнению с медью), тем легче протекает возврат и полнее происходит

релаксация напряжений. Однако на степень деформационного упрочнения при этих температурах могут также влиять и процессы взаимодействия дислокаций с межузельными атомами примесей или их комплексами с точечными дефектами, приводящие в ряде металлов (например, железо, титан и т. д.) к закреплению (блокировке) дислокаций и препятствующие релаксации напряжений. Эти процессы принято называть динамическим деформационным или просто деформационным старением, в зависимости от того, какие дислокации подвергаются блокировке — движущиеся или неподвижные.

Таким образом в условиях холодной сварки большинства металлов формирование общих зерен в зоне соединения невозможно из-за того, что при комнатной температуре рекристаллизационные процессы в них протекать не могут. В то же

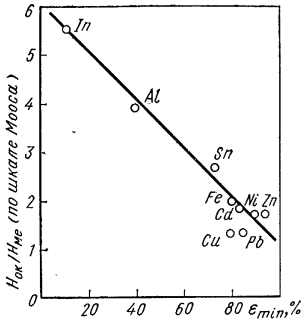


Рис. 5. Зависимость степени деформации схватывания ε_{min} от соотношения твердости окисной пленки и металла (по шкале Мооса) [3]

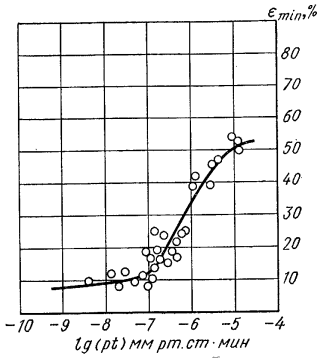


Рис. 6. Зависимость степени деформации схватывания ε_{min} для алюминия от $\lg pt$ (где t — время выдержки в вакууме между очисткой и сваркой; p — давление) (по данным Б. Н. Веркина и др.)

время для некоторых легкоплавких металлов, например индия, галлия, свинца и т. п., комнатная температура выше температуры рекристаллизации обработки, и термин «холодная сварка» к ним применять можно только условно.

По условиям протекания завершающей стадии процесса, т. е. стадии объемного взаимодействия, сварка этих металлов давлением ближе к термокомпрессионной или диффузионной, чем к холодной сварке.

Однако общее принципиальное отличие холодной сварки любых металлов от большинства способов их сварки в твердом состоянии при повышенных температурах связано с необходимостью разрушения и удаления окисных пленок из зоны контакта механическим путем, т. е. за счет интенсивной совместной пластической деформации. Величина пластической деформации, требуемой для разрушения и удаления окисных пленок, тем больше, чем меньше отношение твердостей пленки и металла (рис. 5) и чем толще пленка. Далее пластическая деформация, как и при всех других способах сварки в твердом состоянии, обеспечивает образование физического контакта, активацию контактных поверхностей и их схватывание на стадии объемного взаимодействия. Различия на этих стадиях не принципиальны и связаны лишь с кинетическими особенностями процесса,

которые определяются большей степенью затрудненности пластической деформации и релаксации напряжений, что дополнительно обусловливает еще большую величину накопленной деформации, требуемой для образования прочного соединения, по сравнению со способами сварки в твердом состоянии при повышенных температурах.

Для оценки большого значения окисных пленок при холодной сварке полезно привести данные по схватыванию металлов в глубоком безмасленном вакууме под давлением с предварительным удалением окисных пленок механической зачисткой поверхностей (рис. 6 и табл. 3).

3. Влияние вакуума на деформацию схватывания меди под давлением в течение 1 мин [3]

p, мм рт. ст.	ε_{min}, %	p, мм рт. ст.	ε_{min}, %	p, мм рт. ст.	ε_{min}, %
$1 \cdot 10^{-5}$	38,0	$1{,}2 \cdot 10^{-7}$	20,0	$3{,}2 \cdot 10^{-9}$	8,0
$1{,}4 \cdot 10^{-6}$	30,0	$7{,}2 \cdot 10^{-8}$	19,3	$2{,}8 \cdot 10^{-9}$	7,0
$1{,}2 \cdot 10^{-6}$	29,4	$4{,}0 \cdot 10^{-8}$	18,6	$2{,}3 \cdot 10^{-9}$	9,3
$6{,}0 \cdot 10^{-7}$	21,0	$1{,}8 \cdot 10^{-8}$	10,7	$1{,}0 \cdot 10^{-9}$	6,9

Эти данные показывают, что схватывание в вакууме зависит не от p и t в отдельности, а от их произведения, так как оно определяет толщину адсорбируемого слоя газов и появляющейся затем окисной пленки на ювенильной поверхности металла. Мономолекулярный слой адсорбированных газов (при $pt = 3 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст.·мин) служит препятствием для холодной сварки, а появление окисной пленки и рост ее толщины (в области pt от 10^{-7} до 10^{-5} мм рт. ст.·мин) резко увеличивает ε_{min} (см. рис. 5).

Сопоставление данных о величине ε_{min} при сварке на воздухе и в глубоком вакууме для таких пластических металлов, как алюминий и медь (см. табл. 1, 2, 3 и рис. 5), показывает, что вклад деформации, необходимой для разрушения и удаления окисных пленок, в общую деформацию схватывания ε_{min} является решающим и составляет примерно около 80—90%. Следует полагать, что эта деформация обеспечивает развитие не только физического контакта, но и всех других стадий процесса образования соединения, включая и активацию контактных поверхностей и объемное взаимодействие.

Для менее пластичных металлов, особенно с ОЦК-решеткой (железо, ниобий и т. д.), величина деформации схватывания ε_{min} значительно превышает деформацию, необходимую для разрушения и удаления окислов, так как из-за невозможности схватывания этих металлов по всей поверхности соединения остающиеся несплошности, как концентраторы напряжений, не позволяют вследствие хрупкого характера разрушения реализовать прочность, пропорциональную общей площади схватывания. Существенную роль при сварке этих металлов играют также сильное деформационное упрочнение зоны контакта, большая величина упругой деформации, последействия в процессе разгрузки после сварки и затрудненность релаксации напряжений при комнатной температуре. Поэтому для достижения достаточно высокой прочности соединения требуется существенное увеличение общей деформации схватывания ε_{min}, с тем чтобы уменьшить размер несплошностей между мостиками схватывания до величин, при которых они уже не могут служить опасными концентраторами напряжений.

СВАРКА ВЗРЫВОМ

Сварка взрывом по виду вводимой энергии относится к группе механических процессов соединения металлов. При ней химическая энергия превращения заряда взрывчатого вещества (ВВ) в газообразные продукты взрыва трансформируется в механическую энергию их расширения, сообщая одной из свариваемых частей большую скорость перемещения. Кинетическая энергия соударения движущейся части с поверхностью неподвижной части затрачивается на работу совместной пластической деформации контактирующих слоев металла, приводящей к образованию сварного соединения. Работа пластической деформации переходит в тепло, которое вследствие адиабатического характера процесса из-за больших скоростей может разогревать металл в зоне соединения до высоких температур (вплоть до оплавления локальных объемов).

Принципиальная схема сварки взрывом показана на рис. 7. На основании *1* (земляной грунт, дерево, металл и т. п.) расположена одна из свариваемых деталей *2* (в простейшем случае пластина), над ней параллельно с определенным зазором h расположена вторая деталь *3* на технологических опорах *4*. На ее внешней поверхности находится заряд ВВ *5* заданной высоты H и площади, как правило, равной площади пластины *3* (наиболее широко применяемые для сварки взрывом насыпные ВВ помещаются в открытом контейнере соответствующих размеров). В одном из концов заряда ВВ находится детонатор *6*.

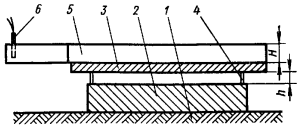


Рис. 7. Принципиальная схема сварки взрывом

При инициировании заряда ВВ по нему распространяется фронт детонационной волны со скоростью D, лежащей для существующих ВВ в пределах 2000—8000 м/с, определяющейся их химическим составом и физическим состоянием. Образующиеся позади него газообразные продукты взрыва в течение короткого времени по инерции сохраняют прежний объем ВВ, находясь в нем под давлением 100—200 тыс. ат, а затем со скоростью 0,50—0,75 D расширяются по нормалям к свободным поверхностям заряда, сообщая находящемуся под ними участку металла импульс, под действием которого объемы изделия последовательно вовлекаются в ускоренное движение к поверхности неподвижной части металла и со скоростью v_c соударяются с ней. При установившемся процессе метаемая пластина на некоторой длине дважды перегибается, ее наклонный участок со скоростью $v_к = D$ движется за фронтом детонационной волны, а участок перед ее фронтом с непродетонировавшей частью заряда ВВ под действием сил инерции продолжает занимать исходное положение (рис. 8).

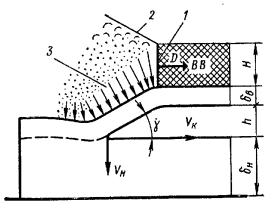


Рис. 8. Схема установившегося процесса сварки взрывом:

1 — фронт детонационной волны; *2* — фронт разлета продуктов взрыва ВВ; *3* — фронт волны разрежения; D — скорость детонации ВВ; $v_н$ — нормальная составляющая скорости соударения контактирующих поверхностей; $v_к$ — скорость движения вершины динамического угла встречи контактирующих поверхностей γ в направлении сварки ($v_к = D$)

Высокоскоростное соударение метаемой части металла с неподвижной развивает в окрестностях движущейся вершины угла γ встречи их контактирующих поверхностей давления $10^2 — 10^3$ кбар. Вызываемое им всестороннее неравномерное сжатие с наиболее благоприятными условиями для пластического течения в направлении процесса сварки благодаря наличию свободной поверхности перед вершиной угла γ и возникновению тангенциальной составляющей скорости v_c заставляет металл поверхностных слоев обеих соударяющихся частей

совместно деформироваться в этом же направлении со скоростью $v_к$, что приводит к тесному сближению свариваемых частей. При этом процессе окисные пленки и другие поверхностные загрязнения дробятся, рассредоточиваются, а также выносятся из вершины угла γ под действием кумулятивного эффекта.

Таким образом, реализуется известная способность металлов образовывать прочные металлические связи в твердой фазе при создании между соединяемыми поверхностями физического контакта и условий для электронного (химического) взаимодействия между ними. Требующаяся для второй стадии процесса энергия активации обеспечивается за счет работы пластической деформации и вызывае-

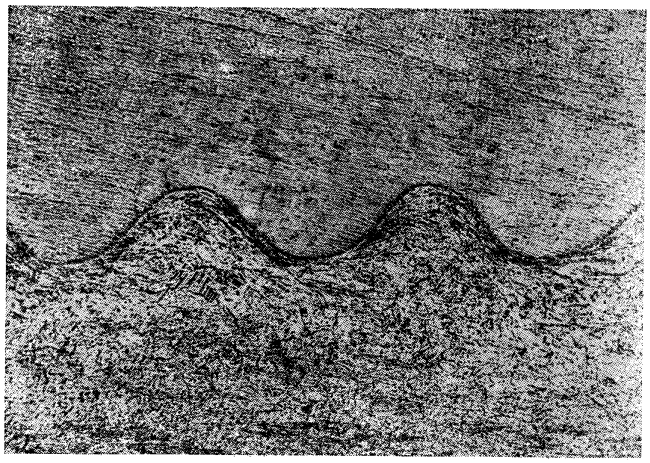


Рис. 9. Типичная граница раздела металлов в соединениях, сваренных взрывом. Вверху — ниобий, внизу — медь ($\times 100^{\times}$)

мого ею нагрева. Объемная диффузия из-за скоротечности процесса, даже несмотря на нагрев, развиваться не успевает, что позволяет широко применять сварку взрывом для соединения разнородных металлов и сплавов — граница раздела металлов обычно резко выражена и имеет вид регулярных синусоидальных волн (рис. 9).

Параметры режима сварки. Динамическими параметрами процесса сварки взрывом являются скорость соударения контактирующих поверхностей v_c; скорость движения вершины угла встречи контактирующих поверхностей вдоль соединения $v_к$; кинетическая энергия соударения свариваемых частей W (отнесенная для удобства к единице площади соединения).

При соударении свариваемых частей по ним распространяется система ударных волн — упругой и следующей за ней пластической, последняя из которых возникает при развитии в окрестностях вершины угла γ определенного динамического давления p и приводит к совместной пластической деформации контактирующих слоев металла. Средняя величина давления p зависит от скорости v_c, физических свойств свариваемых металлов и определяется с помощью ударных

адиабат, построенных в координатах $p - u$ для многих применяемых в технике металлов и сплавов (u — массовая скорость частиц металла за фронтом ударной волны). При известном значении v_c на ударную адиабату металла неподвижной части накладывают зеркальное отображение ударной адиабаты метаемой части, располагая ее начальное состояние в точке A с абсциссой $u = v_c$; ордината точки пересечения адиабат B при этом дает искомую величину p (рис. 10).

Скорость v_c зависит от скорости детонации D, плотности $\rho_{ВВ}$ и высоты H заряда ВВ, толщины δ и плотности $\rho_{пл}$ метаемого металла, а также исходного расстояния h между контактирующими поверхностями. Существует два метода определения величины v_c — экспериментальный и расчетный. Первый заключается в скоростном фотографировании момента установившегося процесса сварки взрывом в вакуумных камерах с помощью фоторегистров типа СФР или рентгеновских импульсных установок. Обработка фотографий позволяет определять величины углов γ и по ним при известных значениях скорости детонации D рассчитывать значения v_c. Не требующим сложного оборудования и камер является хронографический метод, основанный на регистрации с помощью катодных осциллографов промежутков времени между замыканиями метаемой части двух электрических контактов, торец одного из которых расположен заподлицо с контактирующей поверхностью неподвижной части, а торец второго почти вплотную примыкает к контактирующей поверхности метаемой. Изменение от опыта к опыту расстояния h позволяет строить графики путь — время, а по ним с помощью графического дифференцирования вычислять значения v_c.

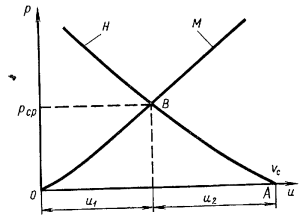


Рис. 10. Зависимость среднего давления p, развивающегося в окрестностях вершины угла γ, от скорости v_c:

OBM и *HBA* — ударные адиабаты материала неподвижной и метаемой пластин

Точных расчетных формул v_c пока получить не удалось из-за сложности расчетной схемы и большого числа переменных величин, определяющих процесс соударения металлических тел при сварке. Из приближенных формул можно рекомендовать следующую:

$$v_c = D\sqrt{1-\left(1-\frac{h\rho_{ВВ}}{4\delta\rho_{пл}}\right)^2}. \qquad (1)$$

В формулу не входит величина H, так как предполагается, что движущийся участок пластины на всем пути h находится под действием импульса от разлета продуктов взрыва (т. е. время их разлета с поверхности движущегося участка превышает время движения последнего от исходного положения до соударения с неподвижной пластиной).

Пластическая деформация металла с помощью известного дислокационного механизма возможна со скоростями, меньшими скорости распространения пластических волн сжатия c. Поэтому для создания в зоне соударения свариваемых частей физического контакта и реализации в нем механизма образования активных центров скорость $v_к$ должна быть меньше скорости c, в противном случае металл не успеет деформироваться, и сварки не произойдет. Это условие легко выполняется путем применения ВВ соответствующего типа, так как при сварке по схеме рис. 2 $v_к = D$, а величину c при известных физических константах свариваемых металлов можно рассчитать по распространенным уравнениям физики взрыва и теории ударных волн из условий сохранения состояния твер-

дых тел под интенсивным давлением. С приемлемой для приближенных оценок точностью величина c может быть определена также по формуле

$$c=\sqrt{\frac{k}{\rho}}, \tag{2}$$

где k — модуль объемного сжатия металла, кгс/см²; ρ — плотность металла, (кгс/см²) · (с²/см).

С этих позиций в настоящее время объясняется первоначальная реализация сварки взрывом по так называемой угловой схеме (с исходным расположением контактирующих поверхностей под некоторым углом α), снижавшей скорость $v_к$ до величин, меньших c, при применении ВВ со скоростями детонации $D > c$ (например, гексогена) по следующей зависимости:

$$v_к = D\frac{\sin(\gamma-\alpha)}{\sin\gamma}. \tag{3}$$

Опыты показывают, что для ряда сочетаний металлов (титан — сталь, алюминий — сталь и т. п.) выполнение условия $v_к < c$ является необходимым, но недостаточным. Прочность их соединений продолжает расти с уменьшением $v_к$ и в «дозвуковой области». При этом нижний предел возможного уменьшения $v_к$ пока составляет 1800—2000 м/с и определяется производством ВВ с этой минимально возможной величиной D.

Для создания прочного соединения металл в зоне соударения должен быть в определенной степени пластически продеформирован, чтобы в течение очень короткого времени, определяющегося скоростью сварки, разорвать подавляющую часть химических связей на обеих контактирующих поверхностях и заменить их новыми. Требуемая энергия активации этого процесса при сварке взрывом может развиваться только в результате пластической деформации металла в вершине угла γ, степень которой обусловливается расходуемой на нее долей кинетической энергии соударения свариваемых частей. Последняя определяется из энергетического баланса сварки взрывом

$$W = W_1 + W_2 + W_3, \tag{4}$$

где W — удельная кинетическая энергия соударения свариваемых частей; W_1 — удельная кинетическая энергия системы сваренных частей; W_2 — удельная кинетическая энергия, затраченная на пластическую деформацию прилегающих к контактирующим поверхностям слоев металла; W_3 — удельная энергия, уносимая из свариваемой системы с металлом под действием кумулятивного эффекта.

В свою очередь,

$$W = \frac{m_1 v_c^2}{2}; \tag{5}$$

$$W_1 = \frac{m_1^2 v_c^2}{2(m_1+m_2)}; \tag{6}$$

$$W_2 = \frac{m_1 m_2}{2(m_1+m_2)} v_c^2\left[1-\left(\frac{v_к}{C}\right)^2\right]; \tag{7}$$

$$W_3 = \frac{m_1 m_2}{2(m_1+m_2)} v_c^2\left(\frac{v_к}{C}\right)^2, \tag{8}$$

где, помимо уже ранее введенных обозначений, m_1 и m_2 — соответственно удельные массы метаемой и неподвижной частей. В приведенном балансе не учитываются диссипативные потери на колебания соударяющихся тел и нагрев метаемого тела продуктами взрыва ВВ из-за незначительности их величин.

Таким образом, если задаться определенными значениями v_c, $v_к$ и W (или W_2), можно рассчитать основные технологические параметры сварки H, h, D и $\rho_{ВВ}$. Однако разработку технологических процессов сварки взрывом пока приходится осуществлять экспериментально — расчетным путем нельзя из-за отсутствия данных о величинах необходимых давлений и деформаций для получения прочных соединений между заданными сочетаниями материалов, а также количественных связей между величинами W_2 и деформации металла. Результаты отдельных исследований показывают, что величины необходимых для образования равнопрочных соединений минимальных давлений p примерно на порядок превышают статический предел текучести свариваемых металлов и, видимо, должны коррелироваться с его динамической величиной при данных скоростях деформации (табл. 4).

4. Результаты исследований

Свариваемые металлы	Давление при сварке p, кгс/см²	Предел текучести $\sigma_т$, кгс/см²
Al + Al	6 300	300
Cu + Cu	24 600	1700
Ст3 + Ст3	60 000	2400

Данных о минимальных пластических деформациях, обеспечивающих равнопрочность сварных соединений, из-за сложности и трудоемкости опытов еще меньше: равнопрочность соединений Ст3 + Ст3 достигается при 36% максимальных сдвигов на границе раздела металлов, в соединениях Ст3 + Al — при 6% со стороны стали.

В дополнение к рассмотренным динамическим параметрам сварки взрывом можно также отнести производный от скоростей v_c и $v_к$ угол встречи контактирующих поверхностей γ и время t действия в окрестностях его вершины давления p, оценка роли которых в процессе сварки исследуется.

Особенности микронеоднородности сварных соединений. Физическая и химическая микронеоднородность, являющаяся общей чертой всех сварных соединений из-за местного приложения энергии при сварке взрывом разделяется на 10 основных видов, обусловленных характером и параметрами этого процесса, свойствами и сочетаниями соединяемых материалов.

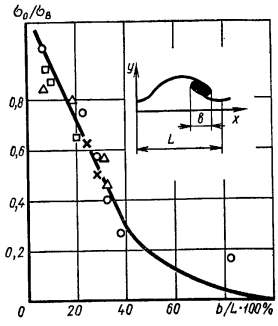


Рис. 11. Схема определения относительной суммарной протяженности физической микронеоднородности второго вида и зависимость от нее относительной прочности сварных соединений:

$\sigma_в$ — прочность сварных соединений без микронеоднородности второго вида и σ_0 — с данной протяженностью этой микронеоднородности; Δ — сталь 12Х18Н10Т + Ст3; □ — сталь 0Х23Н28М3Д3Т + Ст3; × — сталь ХН75МБТЮ + + Ст3; О — титан ВТ6 + сталь 10Г2СД; ○ — сплав Х15Н55М16В + Ст3

Физическая микронеоднородность:
не обнаруживающиеся средствами оптической металлографии участки границы раздела металлов с низкой, доходящей до 0 прочностью, образующиеся

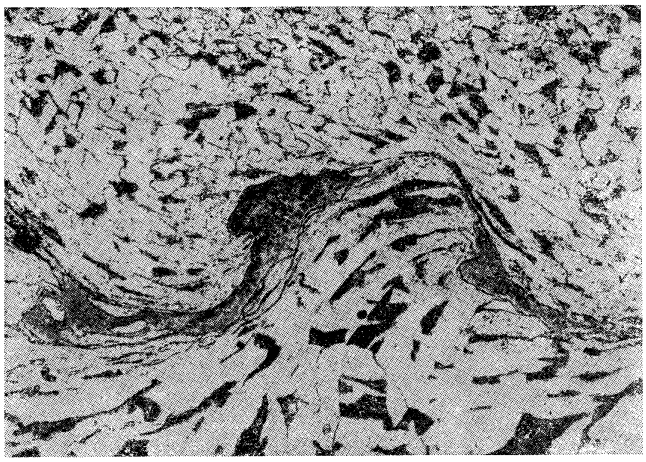


Рис. 12. Участки мартенситной структуры в зоне соединения Ст3 + Ст3 (×300)

при недостаточных величинах v_c и W, видимо, вследствие недостаточного развития пластической деформации, обеспечивающей создание только физического контакта;

искажение синусоидального профиля границы раздела металлов при чрезмерных значениях v_c (а следовательно, и угла γ) со скоплением в завихрениях волн различных дефектов (микропустот, неметаллических включений и т. п.), снижающих прочность соединений с ростом их относительной протяженности практически по линейному закону (рис. 11);

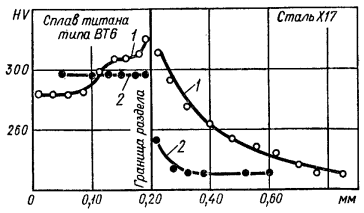


Рис. 13. Распределение твердости по поперечному сечению сварных соединений титан ВТ6 + сталь Х17. v_c = 2000 м/с:
1 — $W = 32 \cdot 10^8$ эрг/см²; *2* — $W = 16 \cdot 10^8$ эрг/см²

участки мартенситной структуры на границе раздела углеродистой и легированной стали, иногда образующиеся из-за чрезмерного локального выделения тепла пластической деформации при развитии ее неравномерности по профилю волн и быстрого отвода тепла в прилежащий холодный металл (рис. 12);

повышающие прочность соединений слои металла у гра-

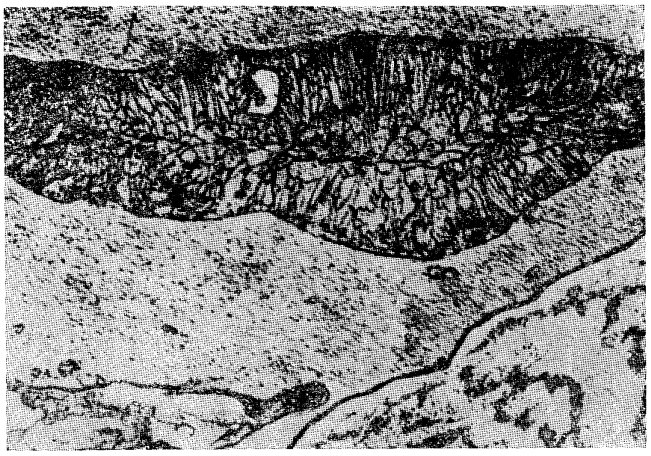


Рис. 14. Участок оплавленного металла в сварном соединении сталь Х25Т (вверху) + сталь 10Г2СД (×300)

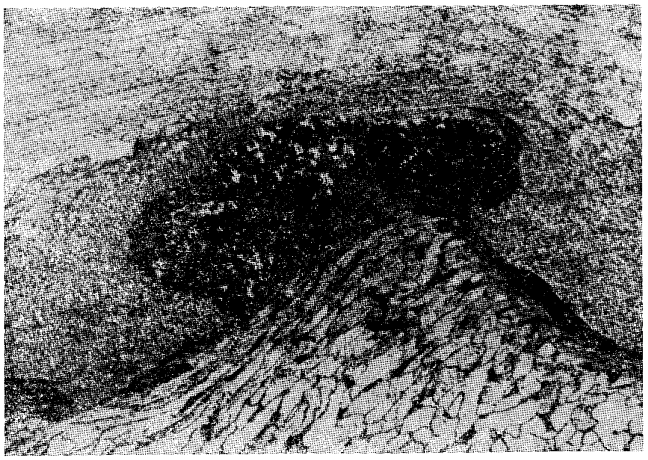


Рис. 15. Рекристаллизованная структура серебра (вверху) около оплавленного участка в соединении со сталью 10 (×100)

ницы раздела, упрочненные пластической деформацией, ширина и твердость которых растет с увеличением W (рис. 13);

локальные участки оплавленного металла в соединениях между однородными металлами, сплавами и сталями, образующиеся при чрезмерных величинах W (рис. 14);

участки рекристаллизованной структуры вблизи границы раздела металлов или оплавленных участков, образующиеся под действием тепла пластической деформации или тепла, выделяющегося при кристаллизации оплавленного металла (рис. 15).

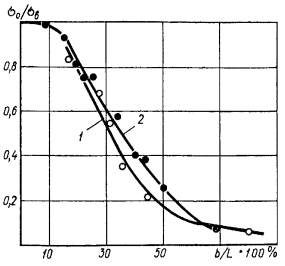


Рис. 16. Падение относительной прочности сварных соединений титан ВТ1-1 + Ст3 (кривая *1*) и цирконий + сталь 12Х18Н10Т (кривая *2*) с увеличением относительной суммарной протяженности оплавленных участков (условные обозначения см. на рис. 15)

Химическая микронеоднородность:

локальные участки оплавленного металла трех видов, образующиеся в соединениях разнородных металлов со свойствами, обусловленными их сочетаниями:

состоящие из твердых растворов, обладающих непрерывной взаимной растворимостью, практически не влияющие (а иногда и повышающие) на прочность соединений, если они не содержат кристаллизационных дефектов;

состоящие из интерметаллических соединений и эвтектик в композициях с ограниченной растворимостью (например, титан — сталь), практически не участвующие в работе соединений и линейно снижающие их прочность с ростом относительной протяженности (рис. 16);

состоящие из мелкодиспергированных частиц обоих сваренных металлов в композициях, не взаимодействующих в равновесном состоянии (например, серебро — сталь), (см. рис. 15); примыкающие к границе раздела металлов слои с однофазной структурой в соединениях двухфазных сплавов с второй фазой, упрочняющей границы твердого раствора; при этом вторая фаза скапливается на внешних границах однофазных слоев (рис. 17). Механизм образования этой неоднородности требует специального изучения.

В заключение необходимо отметить отсутствие на границах раздела разнородных металлов диффузионных зон или перемешивания (в соединениях без оплавленных участков), не обнаруживаемых электронной микроскопией и локальным рентгеноспектральным анализом, что позволяет с помощью сварки взрывом получать прочные соединения между разнородными металлами и сплавами.

Зависимость прочности соединений от параметров сварки. Причины образования того или иного вида микронеоднородности в соединениях различных композиций имеют общий характер и обусловлены величинами v_c и W. Поэтому во всех случаях сварки взрывом зависимость прочности сварных соединений от наиболее важного параметра процесса — скорости v_c, обусловливающей давление P и количество вводимой энергии W, имеет одинаковый характер и выражается кривыми с максимумом (рис. 18), которые условно можно разделить на три области.

В первой из них с увеличением v_c прочность соединений возрастает почти скачкообразно до прочности основного металла за счет исчезновения первого вида физической микронеоднородности. Численные значения v_c, соответствующие достижению в этой области равнопрочности, для различных толщин и сочетаний металлов различны и обычно определяются опытным путем или по данным сварки аналогичных материалов.

Во второй области с увеличением v_c наблюдается некоторый дальнейший рост прочности соединений вследствие развития физической микронеоднородности



Рис. 17. Сварное соединение сплав Д1АМ + сплав Д1АМ после нагрева при 550° С для выявления упрочняющей твердый раствор второй *S*-фазы (черной), (× 120)

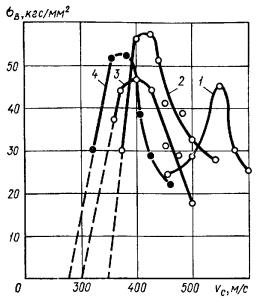


Рис. 18. Зависимость прочности сварных соединений титановых сплавов со сталью от скорости v_c при различных толщинах метаемых пластин ($v_к$ = 2000 м/с):

1 — ВТ1-1 (толщиной 2 мм) + Ст3; *2* — ВТ6 (толщиной 6 мм) + сталь 10Г2СД; *3* — ОТ4-1 (толщиной 8 мм) + Ст3; *4* — ОТ4-1 (толщиной 10 мм) + сталь 12Х18Н10Т

четвертого вида. Ширина этой области для различных сочетаний металлов также различна и может изменяться в широких пределах. В композициях с резко различными физико-химическими свойствами (например, титан — сталь) она узка, в композициях из однородных или близких по свойствам металлов (сталь — сталь) она растянута. Поэтому получить прочные соединения между металлами первого сочетания сложнее по сравнению с вторыми.

В третьей области с дальнейшим увеличением v_c прочность соединений уменьшается, в некоторых случаях до нуля. В композициях из металлов с ограниченной растворимостью причиной этого является оплавление металла на границе раздела, растущее с увеличением значений W (рис. 19). В композициях остальных типов — увеличение относительной протяженности участков со вторым видом физической неоднородности, появляющимся позже (при больших значениях v_c) оплавления.

Замечено, что за счет изменения ширины второй области третья область для одних и тех же сочетаний металлов может смещаться влево с ростом скорости $v_к$ до полного исчезновения второй и падения максимальной прочности соединений (рис. 20).

Влияние исходного состояния свариваемых материалов. Повышение исходной твердости обоих или одного из свариваемых металлов при неизменных параметрах процесса вызывает уменьшение длины и амплитуды волн на границе раздела металлов и увеличение относительной протяженности оплавленных участ-

ков. При сварке однородных материалов это почти не отражается на прочности сварных соединений, при сварке разнородных — является условием, ограничивающим получение равнопрочных соединений: при повышении твердости стали Ст3 от 200 до 400 кгс/мм² прочность ее соединения с титаном ВТ1 падает

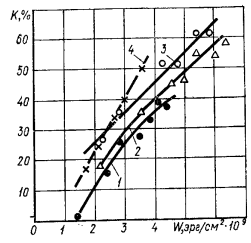


Рис. 19. Зависимость относительной суммарной протяженности оплавленных участков K в сварных соединениях титана ВТ1-1 со сталью Ст3 (кривые *1—3*) и циркония со сталью 12Х18Н10Т (кривая *4*) от кинетической энергии соударения W:
1) $v_к$ = 2000 м/с; *2*) $v_к$ = 2500 м/с; *3*) $v_к$ = 3500 м/с; *4*) $v_к$ = 2000 м/с

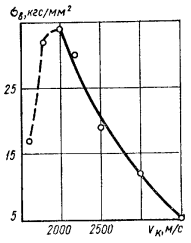


Рис. 20. Зависимость прочности сварных соединений титана ВТ6 толщиной 6 мм со сталью 10Г2СД от скорости $v_к$ при постоянной скорости $v_с$ = = 500 м/с

с 35 кгс/мм² до нуля; изменение твердости алюминиевых сплавов в соединениях со сталью 12Х18Н10Т позволило по оптимальным давлениям соударения P построить «треугольник свариваемости», ограничивающий возможность получения равнопрочных соединений твердостью алюминиевых сплавов в HV 60 (рис. 21).

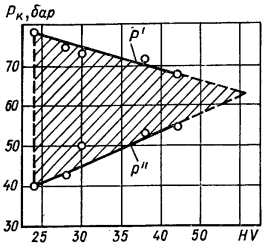


Рис. 21. Зависимость оптимальных давлений соударения P от исходной твердости алюминиевых сплавов в соединениях со сталью 12Х18Н10Т

К чистоте механической обработки контактирующих поверхностей предъявляется следующее требование: шаг между зубцами характерного для механической обработки пилообразного профиля не должен превышать длины волн, зафиксированных на границе раздела металлов при выбранных (оптимальных) условиях сварки данных материалов с гладкими (шлифованными или прокатанными) поверхностями. В противном случае длина волн принудительно повторяет шаг между зубцами механической обработки с образованием завихрений, а в них — соответствующих видов микронеоднородности.

Обязательными являются зачистка до металлического блеска и обезжиривание.

Технологические схемы сварки. Принципиальная схема сварки (см. рис. 7) и представления о динамике процесса (см. рис. 8) позволяют создать ряд технологических схем, приведенных на рис. 22.

Помимо приведенных, существует большое число схем для сварки различных специальных соединений узкого назначения (вплоть до сварки стыков проводов электрических сетей).

Взрывчатые вещества для сварки. Наиболее употребительными являются насыпные ВВ, так как они позволяют легко создавать заряды требуемых форм и размеров. Наиболее важные характеристики выпускаемых промышленностью ВВ приведены в табл. 5. Показатель «критический диаметр» в ней характеризует минимальную площадь поперечного сечения заряда, обеспечивающую его устойчивую детонацию с указанной скоростью. Из-за значительного разброса скоростей детонации целесообразно для каждой партии ВВ определять ее опытным путем.

5. Характеристики ВВ, применяемых для сварки взрывом

Марка ВВ	Насыпная плотность, г/см³	Критический диаметр, мм	Скорость детонаций, км/с	Гарантийный срок использования, месяцы
Гранулотол	0,95—1,0	60—80	4,5—5,0	24
Гранулит:				
С-2	0,80—0,95	120—150	2,4—3,2	
АС-4		100—120	2,6—3,2	
АС-8	0,87—0,92	80—100	3,0—3,6	
Зерногранулит:				
горячего смешения 79/21	0,85—0,90	25—35	3,5—4,2	6
холодного смешения 79/21	0,80—0,85	50—60	3,0—3,6	
50/50В	0,85—0,90	40—50	3,6—4,2	
Аммониты:				
скальный № 1	0,95—1,1	5—6	4,8—5,3	
№ 3	0,90—1,1	8—10	4,0—4,5	
В-3 (порошок)	0,85—0,9	13—15	3,6—4,0	
№ 6 ЖВ		10—13	3,6—4,8	3
№ 7 ЖВ	0,78—0,83	11—13	3,5—4,0	
№ 9 ЖВ	0,72—0,78	20—25	3,0—3,5	
№ 10 ЖВ	0,75—0,80	15—20	3,2—3,6	6
№ ПЖВ-20	1,1—1,18 *¹	12—14	3,5—4,0	
Аммонал:				
водоустойчивый	0,95—1,1	12—14	4,0—4,5	
30/70В	0,85—0,90	40—60	3,8—4,5	
ТЭН	1,0	—	3,2	—
Аммиачная селитра	—		1,8	
Гексоген *²	1,05		8,3	

*¹ Патрон.
*² Применялся для сварки по угловой схеме, используется для изготовления детонационного шнура (ДШ).

Области применения. Перспективы и области применения сварки взрывом определяются способностью создавать в твердой фазе прочные соединения за счет поверхностных металлических связей без развития объемной диффузии вследствие скоротечности процесса на больших, практически неограниченных площадях (имеются примеры сварки соединений площадью 15—20 м²). Это позволяет применять сварку взрывом для:

изготовления композиционных сутунок и слябов с высокопрочным соединением слоев из разнородных металлов, сплавов и сталей для прокатки в двух- и многослойные листы;

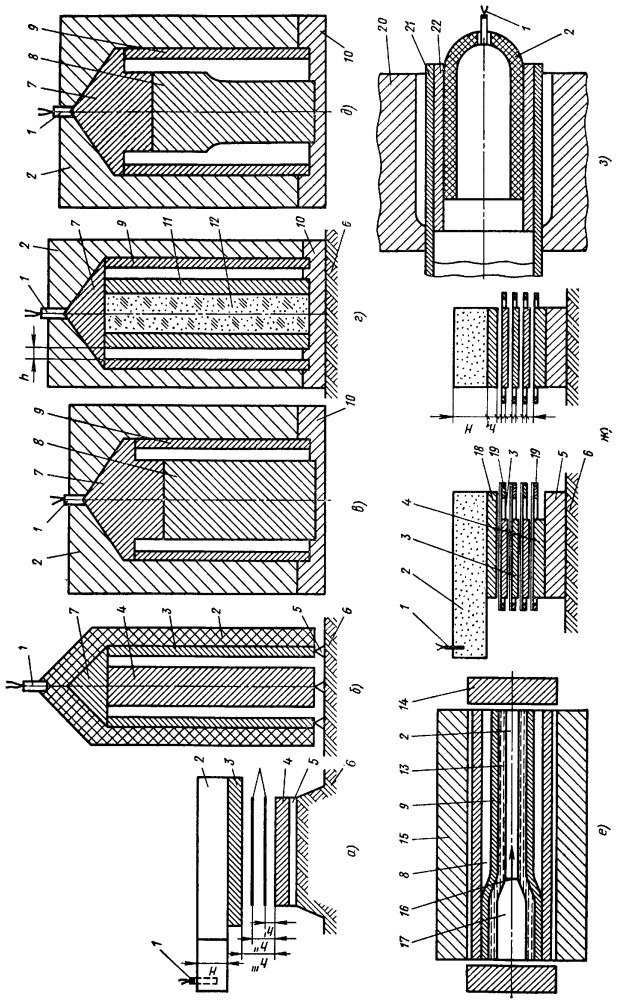


Рис. 22. Технологические схемы сварки взрывом соединений различного типа:

а — сварки трех- и многослойных плоских соединений одним зарядом ВВ; *б* — одновременной приварки двух наружных слоев к среднему двумя зарядами ВВ; *в, г* — наружной облицовки цилиндров с помощью кольцевого заряда ВВ; *д* — сварки биметаллических цилиндрических заготовок переменного диаметра для изготовления бесступенчатых трубатых переходников; *д, е* — внутренней облицовки цилиндров и труб; *ж* — изготовления волокнистых композиционных материалов в виде листов; *з* — вварки труб в трубные доски теплообменников:

1 — детонатор; *2* — заряд ВВ; *3* — метаемые пластины; *4* — неподвижная пластина; *5* — основание; *6* — грунт; *7* — металлическая призма или конус для центрирования заготовок; *8* — облицовываемый цилиндр; *9* — метаемая труба; *10* — центрирующая шайба; *11* — полая цилиндрическая неподвижная заготовка; *12* — наполнитель (вода, битум, легкоплавкий металл); *13* — слой воды; *14* — металлические заглушки; *15* — металлическая обойма; *16* — фронт детонационной волны; *17* — продукты взрыва; *18* — слой армирующих волокон; *19* — рамы для натяжения волокон; *20* — трубная решетка; *21* — труба; *22* — буферная пластмассовая цилиндрическая вставка

непосредственного изготовления биметаллических листов металлов и сплавов в любых сочетаниях;

изготовления сплошных и полых цилиндрических композиционных заготовок для профильного проката и непосредственного использования в деталях машин;

непосредственной облицовки заготовок деталей машин (например, лопастей гидротурбин) металлами и сплавами;

изготовления из разнородных металлов и сплавов плоских композиционных карточек с высокопрочным соединением слоев, вырезки из них поперек слоев переходников необходимой конфигурации (полос, колец, фланцев и т. п.) и вварки их обычными способами между деталями из одноименных материалов; в этом случае открываются широкие возможности для создания композиций с промежуточными слоями, играющими при нагревах роль диффузионных барьеров между основными, и для повышения прочности и работоспособности таких переходников с помощью контактного упрочнения промежуточных слоев при уменьшении их относительной толщины в неограниченных пределах;

изготовления в виде плоских листов и цилиндрических обечаек волокнистых композиционных материалов с неограниченным числом слоев матрицы и волокон;

изготовления некоторых типов сварных соединений между элементами конструкций из однородных и разнородных материалов (например, труб с трубными досками);

нанесения порошковых покрытий на металлические поверхности.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СВАРКА

Ультразвук находит широкое применение в науке для исследования некоторых физических явлений и свойств веществ. В промышленности ультразвуковые колебания используются для очистки и обезжиривания изделий, для обработки труднообрабатываемых материалов. Установлено благоприятное влияние ультразвуковых колебаний на кристаллизующиеся расплавы — происходит дегазация и измельчение зерна и улучшение механических характеристик литых металлов. Получены положительные эффекты при воздействии ультразвуковых колебаний с целью снятия остаточных напряжений. Широкое использование ультразвук находит с целью интенсификации многих медленнотекущих химических реакций. Известна аппаратура для контроля уровня жидкости, скоростей ее течения и т. п. Успешно используется ультразвук для контроля качества литья, сварных соединений и т. п.

В сварочной технике ультразвук может быть использован в различных целях. Воздействуя им на сварочную ванну в процессе кристаллизации, можно улучшить механические свойства сварного соединения благодаря измельчению структуры металла шва

и лучшему удалению газов. Ультразвук может быть источником энергии для создания точечных и шовных соединений. Ультразвуковые колебания активно разрушают естественные и искусственные пленки, что позволяет сваривать металлы с окисленной поверхностью, покрытые слоем лака и т. п. Ультразвук уменьшает или снимает собственные напряжения, возникающие при сварке. Им можно стабилизировать структурные составляющие металла сварного соединения, устраняя возможность самопроизвольного деформирования сварных конструкций со временем.

Сварка металлов ультразвуком находит все более широкое применение, так как этот способ имеет ряд преимуществ и особенностей по сравнению с контактной и холодной сваркой. Особенно перспективна ультразвуковая сварка применительно к изделиям микроэлектроники. Весьма перспективна сварка ультразвуком пластмасс; этот метод широко используется в промышленности, так как обладает рядом особенностей, дающих возможность получить высококачественное соединение на многих пластмассах, сварка которых другими методами затруднена или невозможна.

В СССР разработаны оборудование и технология ультразвуковой сварки металлов и пластмасс, успешно использующиеся в промышленности. За рубежом этот метод также находит применение в промышленности.

При сварке ультразвуком неразъемное соединение металлов образуется при совместном воздействии на детали механических колебаний высокой частоты и относительно небольших сдавливающих усилий. В принципе этот метод сварки имеет много общего с холодной сваркой сдвигом.

Колебания, возникающие в какой-либо среде и характеризующиеся упругими деформациями среды, называются упругими. Форма упругих колебаний может быть различна. Наиболее распространенной формой являются гармонические колебания, т. е. колебания, описываемые выражением

$$A = A_м \sin(\omega t + \varphi),$$

где A — смещение или деформация в данном элементе среды в момент времени t; $A_м$ — максимальное значение смещения или деформации; ω — круговая частота колебаний; φ — начальный угол сдвига.

Упругие колебания, частота которых превышает некоторую границу, принято называть ультразвуковыми. Обычно считают, что нормальный человеческий слух не воспринимает в виде слышимого звука гармонические упругие колебания с частотой выше 17 000—20 000 Гц. В практике упругие колебания используются в диапазоне частот от 8000 Гц до мегагерц. При ультразвуковой сварке обычно используется диапазон частот 18—80 кГц.

Скорость распространения ультразвука зависит от физических свойств материала. Например, в стержне скорость распространения продольных волн определяется из следующего соотношения:

$$c = \sqrt{E/\rho},$$

где E — модуль упругости материала; ρ — плотность материала.

Скорость распространения звуковых волн в большинстве твердых тел колеблется в пределах 2000—6000 м/с и изменяется в зависимости от температуры, давления и интенсивности звука.

Длина волны, соответствующая данной частоте, непосредственно определяется из равенства

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

где c — скорость звука; f — частота.

При частоте 20 кГц длина волны в стали равна 28 см.

Интенсивность плоской продольной звуковой волны в любой среде определяется из уравнения

$$J = kA^2f^2\rho c,$$

где A — амплитуда колебаний; f — частота колебаний; ρ — плотность среды; k — коэффициент пропорциональности; c — скорость звука в среде.

Поток энергии волны сквозь некоторую поверхность S равен

$$\Phi = \int_S J\, dS \cos\beta,$$

где β — угол между нормалью к площадке dS и направлением распространения волны.

Мощность ультразвука, которая может быть передана через среду, зависит от физических свойств среды; если напряжения в зонах сжатия и разрушения пре-

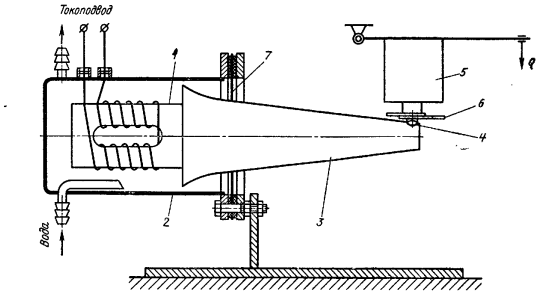


Рис. 23. Схема установки для точечной сварки ультразвуком

высят предел прочности материала, то твердый материал будет разрушаться. В жидкостях в аналогичных случаях возникает кавитация с образованием мельчайших пузырьков паров жидкости и последующим их захлопыванием. Процесс захлопывания кавитационных пузырьков сопровождается возникновением местных давлений, превышающих 5000 кгс/см². Это явление в жидкостях используется для обработки и очистки изделий.

Машины для ультразвуковой сварки состоят из следующих основных узлов: источника питания, аппаратуры управления, механической колебательной системы и привода давления.

Механическая колебательная система служит для преобразования электрической энергии в механическую, передачи этой энергии в зону сварки, концентрирования этой энергии и получения необходимой величины колебательной скорости излучателя.

Колебательная система (рис. 23) состоит из электромеханического преобразователя *1* с обмотками, заключенного в металлический корпус *2*, охлаждаемый водой; трансформатора упругих колебаний *3*; сварочного наконечника *4*; опоры с механизмом давления *5* и свариваемых деталей *6*. Крепление колебательной системы производят с помощью диафрагмы *7*. Ультразвук излучается только в момент сварки точки.

На рис. 24 показана схема шовной сварки ультразвуком, которая может быть использована для получения герметичных швов на изделии. В этой схеме

сварки колебательная система приводится во вращение специальным приводом. При сварке изделие зажимается между концом вращающегося трансформатора упругих колебаний, выполненного в виде ролика, и нижним прижимным роликом. Ультразвук излучается непрерывно в процессе сварки. Элементом колебательной системы, возбуждающей упругие колебания, является электромеханический преобразователь, использующий магнитострикционный эффект. Переменное напряжение создает в обмотке преобразователя намагничивающий ток, кото-

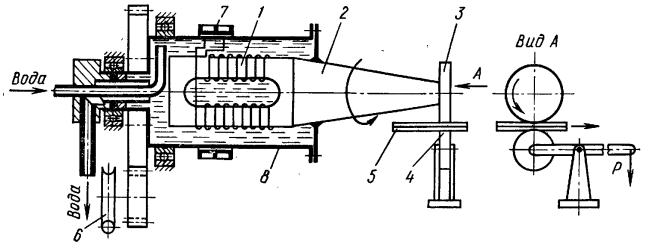


Рис. 24. Схема установки для роликовой сварки ультразвуком:

1 — электромеханический преобразователь; *2* — трансформатор упругих колебаний; *3* — сваривающий ролик; *4* — прижимной ролик; *5* — изделие; *6* — механизм привода; *7* — подвод тока от ультразвукового генератора; *8* — кожух преобразователя

рый возбуждает переменное магнитное поле в материале преобразователя. При изменении величины напряженности магнитного поля в материале возникает периодическое изменение размеров, при этом частота упругих колебаний равна двойной частоте тока.

Свойства некоторых магнитострикционных материалов (К49Ф2 — 49% Co, 1,5—1,8% V, остальное Fe; К65—65% Co, остальное Fe; Ю14—13,8% Al, остальное Fe; Гиперник — 50% Ni, остальное Fe) приведены в табл. 6.

6. Сравнительные данные основных констант магнитострикционных материалов

Материал	Магнитострикционное удлинение $\lambda_s \cdot 10^{-6}$, см/см	Намагниченность насыщения $4\pi I_s$, Гс	Коэрцетивная сила Нс, Э	Электрическое сопротивление $\rho \cdot 10^{-6}$, Ом·см	Плотность γ, г/см³	Модуль упругости E, кгс/см²	Точка Кюри, К
Никель	35	6 000	0,6—1,0	7	8,7	1,6—2,1	360
К49Ф2	70	24 000	1,6—2,0	26	6,2	2,1—8	980
К65	90	22 000	3,7	8	8,25	2,2	—
Альфер Ю-14	50	13 400	0,7	90	6,65	1,43—1,77	500
Альфер Ю-12	35	15 000	0,6	90	6,75	1,5	—
Гиперник	25	16 000	0,05	46	8,3	1,39—1,46	—

Изменения размеров магнитострикционных материалов незначительны. Так, для сплава К49Ф2 магнитострикционное удлинение составляет $70 \cdot 10^{-6}$. Поэтому для увеличения амплитуды смещения и концентрации энергии колебаний, а также для передачи механических колебаний к месту сварки используют волноводы и трансформаторы упругих колебаний. Основным назначением трансформаторов упругих колебаний является увеличение амплитуды колебаний до величины, необходимой для осуществления процесса сварки. Для этой цели

концентратор выполняется в виде стержня специальной формы, площадь поперечного сечения которого изменяется вдоль направления распространения колебаний по определенному закону.

Эксперименты показывают, что для целей сварки металлов достаточно иметь трансформаторы с коэффициентом усиления ~ 5, так чтобы амплитуда на конце его при холостом ходе была равна 20—30 мкм.

Магнитострикционный преобразователь и трансформаторы должны быть рассчитаны и изготовлены на заданную частоту ультразвукового генератора. На рис. 25 показана схема изменения амплитуды колебаний в трансформаторе упругих колебаний.

Питание электромеханических преобразователей осуществляется от источника электрической энергии — генератора с частотой колебаний тока 18—180 кГц.

Рабочая частота генератора определяется собственной частотой механической колебательной системы, выходная мощность генераторов 0,01—10,0 кВт.

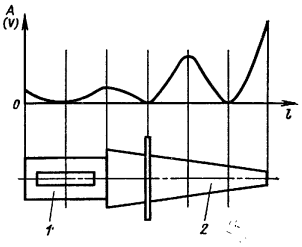


Рис. 25. Схема распределения амплитуд колебаний (скоростей) в магнитострикционном преобразователе с трансформатором упругих колебаний:

1 — электромеханический преобразователь; *2* — трансформатор упругих колебаний

Процесс ультразвуковой сварки происходит при воздействии сдвигающих высокочастотных колебаний, давления, приложенного перпендикулярно к поверхности листа, и теплового эффекта, сопровождающего процесс сварки. В результате в зоне сварной точки наблюдается небольшая пластическая деформация.

Исследование процесса образования сварного соединения при ультразвуковой сварке медных пластин толщиной $0{,}35 + 0{,}35$ мм показывает, что при малом времени пропускания ультразвука (менее 0,05 с) сварка не происходит. После разъединения образцов на их поверхности непосредственно под свариваю-щим выступом наблюдается пятно, имеющее полированную поверхность (рис. 26, *а*).

Диаметр полированного пятна возрастает при увеличении времени сварки (рис. 26, *а* — *д*). При пропускании ультразвука в течение 0,1 с в местах контакта обнаруживаются не только зашлифованные поверхности, но и вырывы металла, свидетельствующие об образовании прочных соединений, так называемых узлов схватывания. На рис. 26, *б* виден один узел схватывания на зашлифованной поверхности.

Пропускание ультразвука в течение 0,73 с привело к дальнейшему увеличению площади зашлифованного пятна, при этом площадь узла схватывания также возросла. Вокруг основного узла схватывания возникли отдельные небольшие участки схватывания, удлиненные в направлении ультразвуковых колебаний. С увеличением времени пропускания ультразвука $> 0{,}73$ с площадь зашлифованного участка почти не изменяется (рис. 26, *г*, *д*), но площадь узлов схватывания начинает увеличиваться более интенсивно. При пропускании ультразвука свыше 1,06 с происходит разрушение сварного соединения с вырывом точки по всему контуру.

Проведенные измерения микротвердости поверхности зашлифованного пятна и основного металла вблизи пятна показали, что микротвердость поверхностного слоя зашлифованного пятна выше (42—44 $H_м$), чем у основного металла (28—30 $H_м$). Образование полированного пятна на свариваемых поверхностях указывает на то, что оно возникло вследствие трения под действием высокочастотных колебаний соприкасающихся поверхностей непосредственно под контактным выступом.

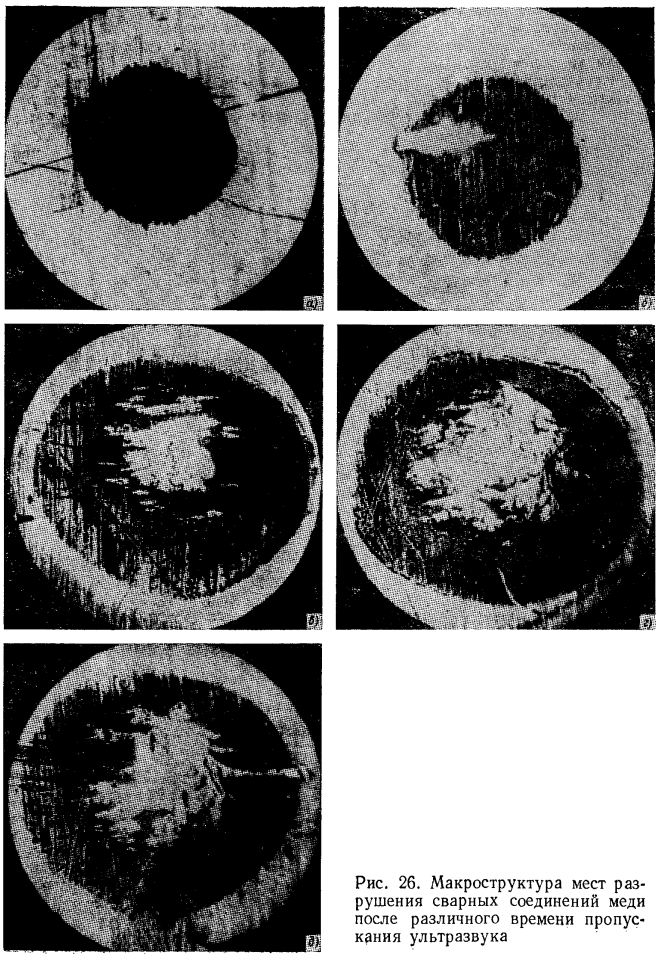


Рис. 26. Макроструктура мест разрушения сварных соединений меди после различного времени пропускания ультразвука

Таким образом, процесс ультразвуковой сварки происходит под действием трения, вызванного микроскопическим возвратно-поступательным перемещением частиц на трущихся поверхностях.

В начальный момент действия ультразвуковых колебаний на свариваемых поверхностях возникает сухое трение. На этой стадии на свариваемых поверхностях происходит разрушение окисных пленок и пленок из адсорбированных

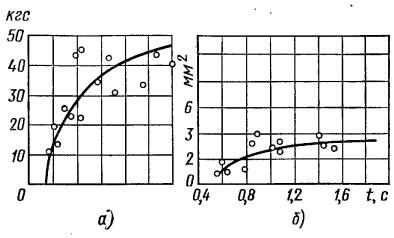


Рис. 27. Влияние продолжительности t пропускания ультразвука:

а — на разрушающую нагрузку при срезе, кгс; *б* — на площадь узлов схватывания, мм²

газов и жидкостей. После возникновения ювенильных поверхностей наступает вторая стадия образования сварного соединения. Процесс сухого трения переходит в чистое трение, которое сопровождается образованием узлов схватывания. Схватыванию в значительной степени способствует малая амплитуда колебаний трущихся поверхностей и возвратно-поступательный характер этих колебаний.

Металлографические исследования сварных образцов различных металлов, сваренных при повышенных давлениях, мощности и времени, не обнаружили в зоне сварки литой структуры или воздействия на металл очень высоких температур.

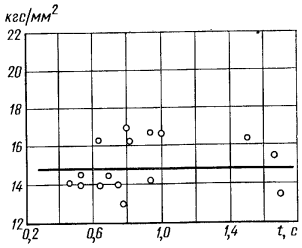


Рис. 28. Зависимость предела прочности при срезе сварного соединения от продолжительности пропускания ультразвука

Микроисследования мест сварки показывают, что имеются общие зерна, принадлежащие обеим свариваемым поверхностям и пересекающие границу раздела; кроме этого, образуются общие границы между поверхностными зернами. Очевидно, в этих обоих случаях сварное соединение будет обладать прочностью, равной прочности основного металла.

На рис. 27, *а* показана зависимость разрушающей нагрузки на точку при срезе от времени пропускания ультразвука. Испытывались медные образцы толщиной 0,35 + 0,35 мм. Из рисунка видно, что разрушающая нагрузка возрастает с увеличением времени пропускания ультразвука. Увеличение разрушающей нагрузки объясняется расширением площади схватывания (рис. 27, *б*).

Даже в случае минимального времени пропускания ультразвука образующееся соединение имеет высокий предел прочности, который не изменяется с увеличением времени пропускания ультразвука и площади узлов схватывания (рис. 28). Аналогичные результаты получены при испытании на срез соединения из алюминия. Средняя величина предела прочности 5,8 кгс/мм² оставалась примерно постоянной и не зависела от времени сварки.

Испытания на отрыв сварных соединений медных образцов показали высокий предел их прочности (около 20 кгс/мм²), очень близкий к пределу прочности основного металла.

Большие значения предела прочности ультразвуковых сварных соединений подтверждают то, что они образуются вследствие возникновения металлических связей в узлах схватывания, имеющих такую же прочность и природу, как и основной металл.

7. Температура в зоне сварки

Материал	Толщина материала, мм	Режим сварки		Температура, °С
		Время, с	Усилие сжатия, кгс	
Алюминий	0,5 + 0,5	0,5	—	200—300
Медь	1,0 + 1,0	1,5	440	300—350
Цинк	0,85 + 0,85	0,6	220	100—150
Железо	0,4 + 0,4	0,4	260	800—900
Железо + константан	10,0 + 0,65	1,6	19,0	До 730
Медь + константан	0,3 + 0,65	1,0	40	До 450

Тепловые процессы при сварке. Процесс ультразвуковой сварки сопровождается выделением тепла в зоне сварки. Образование тепла вызывается возникновением трения на контактных поверхностях и пластическими деформациями в металле, сопровождающими образование сварного соединения.

Об уровне максимальных температур, полученных при сварке разных металлов, дает представление табл. 7.

Температура в зоне сварки зависит от прочностных характеристик — главным образом от твердости металла и его теплофизических свойств: теплопровод-

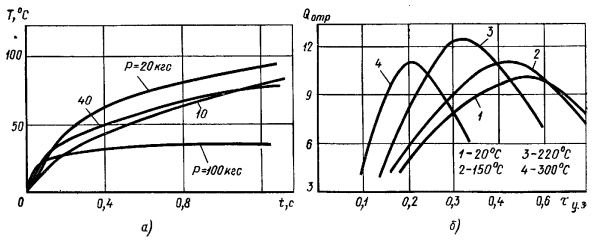


Рис. 29. Тепловыделение при ультразвуковой сварке:

а — термические циклы при сварке алюминия толщиной 0,5 + 0,5 мм в зависимости от продолжительности t пропускания ультразвука и усилия сжатия P, кгс ($T°$, С — температура в точке на внутренней поверхности свариваемых листов); *б* — влияние температуры подогрева на прочность соединений алюминиевых проводников диаметром 0,1 мм с алюминиевыми пленками на ситалле (f = 60 кГц; P = 0,2 кгс; A = 1,5 мкм). На рисунке обозначены: $Q_{отр}$ — усилие отрыва, кгс; $\tau_{уз}$ — длительность ультразвуковых колебаний

ности и теплоемкости, режима сварки. На рис. 29, *а* показаны термические циклы при сварке алюминия толщиной 0,5 + 0,5 мм при различном давлении. Из графиков видно, что существует оптимальное давление, при котором развивается максимальная температура; дальнейшее увеличение давления приводит к увеличению скорости нарастания в начальном участке и уменьшению максимального значения температуры. Это вызвано уменьшением мощности, передаваемой в зону сварки вследствие выхода из резонанса колебательной системы, увеличением площади контакта в зоне сварки и др.

Работы показали, что наблюдающееся повышение температуры не является определяющим фактором, так как максимальная прочность сварных соединений достигается ранее, чем достигается максимальная температура в контакте.

Предварительный подогрев изделия приводит к уменьшению длительности пропускания ультразвуковых колебаний и способствует увеличению прочности сварного соединения (рис. 29, *б*).

Прочность точечных и шовных сварных соединений. На рис. 30 показана зависимость прочности точечных соединений алюминиевых листов от продолжительности пропускания ультразвуковых колебаний и давления на точку. Как видно, при малых давлениях прочность точки в значительной степени зависит от времени прохождения ультразвука. С повышением давления сварные соединения прочнее при меньшем времени прохождения ультразвука. При очень продолжительном пропускании ультразвука и большом давлении сварное соединение некачественно вследствие значительных деформаций основного металла и приваривания его к электроду.

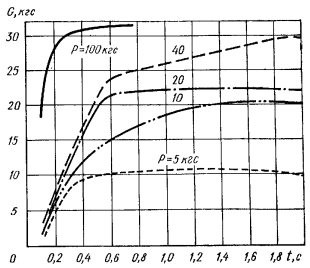


Рис. 30. Прочность G точечных алюминиевых соединений при срезе в зависимости от усилия сжатия P и продолжительности t пропускания ультразвука

При шовной сварке прочность сварных соединений обычно выше прочности основного металла, и разрушение происходит по основному металлу.

Сварка ультразвуком позволяет соединять различные металлы; хорошо свариваются ультразвуком алюминий, медь, никель, удовлетворительно свариваются нержавеющие стали. При этом прочность сварных точечных соединений достаточно высока, разрушение соединений происходит обычно с вырывом точки по контуру как при испытаниях на срез, так и при испытаниях на отрыв.

С помощью ультразвука получены соединения на ряде тугоплавких металлов — ниобии, тантале, молибдене и вольфраме. Однако недостатком сварных соединений вольфрама и молибдена является их хрупкость.

Важным обстоятельством ультразвуковой сварки является возможность соединения различных металлов, которые обычными методами не соединяются.

Ультразвуковые сварочные машины. Ультразвуковая сварка в последнее время нашла наибольшее применение в микроэлектронике, в основном для приварки токоотводов к интегральным схемам.

8. Технические характеристики машин для сварки деталей микротолщин

Наименование показателей	Показатели по типам машин			
	УЗС	УЗС-2	МС-41П2-1	УЗСКН-1
Мощность, Вт	30	20		
Рабочая частота, кГц	60	44	66	44
Контактная сила, кгс	До 0,5		0,02—0,250	0,02—1,0
Производительность (число точек в минуту)	—		20	3
Масса, кг	130	140	210	215

В СССР разработаны и выпускаются сериями ультразвуковые машины для сварки различных элементов микросхем (табл. 8 и 9), оснащенные автоматическими устройствами (автоматически осуществляется подача проводников, сварка, обрезка проводников и т. п.), позволяющими в значительной степени увеличивать производительность.

9. Технические характеристики машин типа МТУ и КТУ, разработанных ВНИИЭСО

Наименование показателей	Показатели типа машин			
	МТУ-0,4	МТУ-1,5	КТУ-1,5	МТУ-4
Мощность, кВт	0,4	1,5		4,0
Частота, кГц	22,0			18,0
Контактная сила, кгс	6—60	15—150	15—120	50—550
Толщина свариваемых металлов (медь), мм	0,01—0,2	0,1—0,5		0,3—1,2
Производительность (число точек в минуту)	До 60			
Масса, кг	76	82	80	105

Установки типа УЗС и УЗС-2 предназначены для присоединения круглых (диаметром 0,03—0,1 мм) и плоских (толщиной до 0,1 мм) проводников из пластинчатых материалов (золото, алюминий) к тонким золотым, алюминиевым и медным пленкам, напыленным на диэлектрические подложки. Установки комплектуются ламповым ультразвуковым генератором.

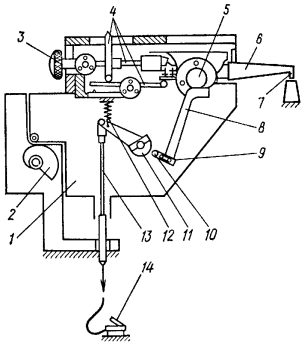


Рис. 31. Кинематическая схема полуавтомата МС-41П2-1

Полуавтомат МС-41П2-1 (рис. 31) предназначен для монтажа микросхем в круглом и плоском корпусах ультразвуковой сваркой с золотыми и алюминиевыми проводниками диаметром 20—25 мкм. Высокая производительность станка (до 800 сварок в час) обеспечивается автоматической подачей и обрывом проволоки. В полуавтомате для повышения стабильности прочностных показателей используется сопутствующий подогрев. Полуавтомат состоит из следующих узлов: сварочной головки, кассеты с проволокой, ультразвукового генератора, блока регулировки температуры подогрева, манипулятора и микроскопа МБС-2. Электрическая схема управления машиной выполнена на транзисторных логических элементах с бесконтактной коммутацией цепей. Ультразвуковой генератор на транзисторах имеет автоматическую подстройку частоты, в результате чего достигается стабильность амплитуды колебания сварочного инструмента.

Корпус сварочной головки *1* автомата (рис. 31) может перемещаться вертикально в направляющих. Ее подъем и опускание производится кулачком *2*. В установленном положении сварочная головка фиксируется стопором. Механическая колебательная система *6* укреплена в корпусе на оси *5*. Поворот системы осуществляется при помощи кронштейна *8* от кулачка *11*. Кулачок поворачивается от перемещения тяги *13* при нажатии на педаль *14*. Обратный ход кулачка происходит под действием пружины *12*. Начальное положение сварочного наконечника *7* относительно свариваемой детали регулируется перемещением ползуна *9* с роликом *10* в пазу кронштейна *8*. Усилие сжатия регулируется ручкой *3* механизма давления *4*.

Установка для ультразвуковой сварки с импульсным косвенным нагревом УЗСКН-1 предназначена для использования при производстве полупроводниковых приборов, тонкопленочных и полупроводниковых интегральных схем. В установке использован комбинированный метод — ультразвуковая сварка с импульсным косвенным нагревом микроэлементов. Установка предусматривает возможность сварки как комбинированным циклом с любой последовательностью импульсов и с разной длительностью смещения моментов их включения, так и раздельным ультразвуковым или косвенным нагревом. Нагрев свариваемых элементов осуществляется за счет теплопередачи от сварочного инструмента (пуансона), нагреваемого импульсом проходящего через него тока промышленной частоты (50 Гц). Для осуществления токоподвода к сварочному инструменту применена конструкция «расщепленного» преобразователя ультразвуковых колебаний, где волновод разрезан на две равные части, между которыми расположен тонкий слой изоляции (рис. 32). Сварочный инструмент в виде V-образной иглы вставляется в отверстие на рабочем конце «расщепленного» волновода между его обеими частями и стягивается винтом для обеспечения хороших акустических и электрического контактов. На установке можно приваривать круглые (диаметром до 0,03—0,1 мм) и плоские (толщиной до 0,05 мм) проводники из алюминия, золота, меди к контактным площадкам из золота, алюминия, меди, тантала, никеля, напыленные на диэлектрические полупроводниковые подложки.

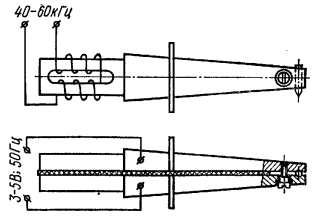


Рис. 32. Преобразователь ультразвуковых колебаний к установке УЗСКН-1

Опыт эксплуатации сварочных ультразвуковых установок показал, что этот метод является наиболее перспективным в микроэлектронике, так как обеспечивается получение высоконадежных соединений, исключается общий разогрев изделия, появляется возможность соединять трудносвариваемые обычными методами сочетания материалов и т. п.

Акустический узел (рис. 33) серии машин (табл. 9) состоит из резонирующего стержня со сварочным наконечником и концентратора с магнитострикционным преобразователем с обмоткой. Диаметр контактной площади наконечника определяется технологическими требованиями к сварной точке.

Сварочный наконечник изготовлен из высоколегированной стали, применение которой исключает налипание свариваемых материалов (медь, алюминий) на наконечник и не требует зачистки даже после сварки 5—20 тыс. точек. Усилие сжатия свариваемых деталей осуществляется приводом давления. Перемещение акустического узла в горизонтальном направлении осуществляется приводом перемещения.

На рис. 34 представлена сварочная головка ультразвуковых сварочных клещей.

Принцип построения механической колебательной системы аналогичен системе, принятой в сварочной машине типа МТУ-0,4-3:

приварка медных проводников (без предварительной зачистки изоляции) диаметром 0,3 мм, покрытых термостойким лаком, к клеммной колодке;

приварка контактов размеров 1,5 × 1,5 × 0,4 мм из платино-иридиевого сплава марки ПИ-10 к контактным пружинам из нейзильбера толщиной 0,12 мм и бериллиевой бронзы Б-2 толщиной 0,15 мм;

прессовая сварка по всему контуру медного корпуса прибора типа П6 с медной крышкой толщиной 0,3 мм; диаметр свариваемого шва ≈ 10 мм, усилие сжатия 240 кгс, время сварки 10 с; испытания сваренных корпусов в вакууме и на термоудар показали герметичность соединений;

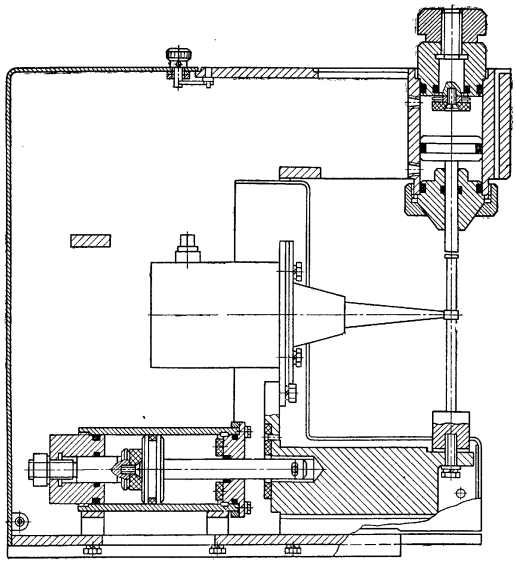


Рис. 33. Акустический узел машины МТУ-0,4

присоединение токоотводов при изготовлении электролитических конденсаторов (рис. 35).

Преимущества сварки ультразвуком:

сварка осуществляется в твердом состоянии металла без существенного нагрева места сварки, что дает возможность соединять химически активные металлы или пары металлов, склонные образовывать хрупкие интерметаллические соединения в зоне сварки;

возможность соединения тонких и ультратонких деталей, возможность приварки тонких листов и фольги к деталям неограниченной толщины, сварка пакетов из фольги;

снижение требований к чистоте свариваемых поверхностей дает возможность проводить сварку плакированных и оксидированных поверхностей и вообще сварку металлических изделий, поверхности которых покрыты различными изоляционными пленками;

применение небольших сдавливающих усилий (10—250 кгс), вследствие чего деформация поверхности деталей в месте их соединения незначительна (вмятина, как правило, не превышает 5—10%);

малая мощность оборудования и несложность его конструкции (если, например, для контактной точечной сварки алюминия толщиной 1 мм необходима машина мощностью 100—150 кВ·А, то при сварке ультразвуком аналогичного соединения потребляется всего 5—2,5 кВ·А).

Область применения. Ультразвуковая сварка нашла достаточно широкое применение для соединения тонких деталей из однородных и разнородных материалов в приборостроении и радиоэлектронной промышленности. В дальнейшем можно ожидать, что этот метод будет использован при сварке металлов, образующих хрупкие интерметаллические

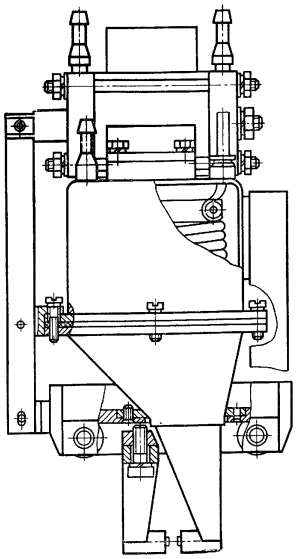


Рис. 34. Сварочная головка клещей КТУ-1,5

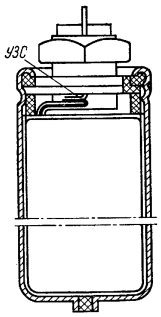


Рис. 35. Алюминиевый электролитический конденсатор с токоотводом, приваренным УЗС

соединения, для приварки тонких обшивок к несущей конструкции (в авиационной промышленности, автомобилестроении и ряде других отраслей промышленности).

По мере совершенствования технологического процесса и оборудования область применения ультразвуковой сварки будет непрерывно расширяться.

СВАРКА ТРЕНИЕМ

Основная схема сварки. Сварка трением является одной из разновидностей сварки давлением. Сварное соединение образуется в твердой фазе, без расплавления металла свариваемых деталей; при сближении поверхностей подлежащих сварке

деталей до очень малых расстояний (соизмеримых с междуатомными) между ними образуются металлические связи, по своей природе и по величине аналогичные силам взаимодействия между атомами в сплошном куске металла. Получение при этом прочного сварного соединения возможно при условии энергичного пластического деформирования тех объемов металла соединяемых деталей, которые расположены вблизи взаимодействующих поверхностей. Однако пластичность подавляющего большинства металлов и сплавов при комнатных температурах этому условию не отвечает. Для их сварки в твердой фазе требуется искусственное увеличение пластичности материала, например, с помощью нагрева соединяемых деталей до достаточно высоких температур (лежащих, однако, ниже температур плавления).

От других видов сварки давлением сварка трением отличается способом нагрева деталей или, точнее говоря, — способом введения тепла в свариваемые детали. В этом процессе необходимый для сварки нагрев деталей осуществляется путем непосредственного преобразования механической энергии в теплоту благодаря работе сил трения.

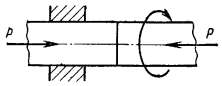


Рис. 36. Принципиальная схема процесса сварки трением

Простейшая и наиболее распространенная схема такого процесса показана на рис. 36. Две детали, подлежащие сварке, устанавливают соосно в зажимах машины; одна из них — неподвижна, а другая приводится во вращение вокруг их общей оси. На сопряженных торцовых поверхностях деталей, прижатых одна к другой осевым усилием P, возникают силы трения. Работа, затрачиваемая при относительном вращении свариваемых заготовок на преодоление этих сил трения, преобразуется в тепло, которое выделяется на поверхностях трения и нагревает прилегающие к ним тонкие слои металла до температур, необходимых для образования сварного соединения (при сварке, например, черных металлов температуры в стыке достигают 1000—1300° С). Таким образом, в стыке, т. е. именно там, где это требуется для целей сварки, действует внутренний источник тепловой энергии, вызывающий быстрый локальный нагрев небольших объемов металла.

В процессе трения пластичный металл стыка выдавливается в радиальных направлениях под воздействием осевого усилия и тангенциальных сил, возникающих в стыке при вращении одной детали относительно другой. Выдавленный металл — грат — имеет характерную для сварки трением форму сдвоенного правильного кольца, расположенного по обе стороны плоскости стыка.

При выдавливании пластичного металла из стыка в радиальных направлениях хрупкие окисные пленки, покрывавшие торцовые поверхности соединяемых деталей до начала сварки, разрушаются, а их обломки, а также продукты сгорания адсорбированных жировых пленок и другие инородные включения вместе с металлом удаляются из стыка в грат.

Нагрев прекращается путем быстрого (практически мгновенного) прекращения относительного вращения. При этом в контакт оказываются введенными очищенные торцовые поверхности соединяемых деталей, металл которых доведен до состояния повышенной пластичности. Для получения прочного соединения достаточно такой подготовленный к сварке металл подвергнуть сильному сжатию— проковать. Это достигается с помощью продолжающего еще некоторое время действовать осевого усилия.

Таким образом, прочность образующегося сварного соединения непосредственно связана:

во-первых, с величиной пластического деформирования концов свариваемых деталей, мерой которой может служить сближение деталей при вытеснении металла в грат — «осадка»;

во-вторых, с режимом проковки.

В свою очередь, степень пластического деформирования зависит от введенной в свариваемые детали энергии, величины осевого усилия и некоторых других факторов.

Основными параметрами процесса сварки трением являются частота относительного вращения свариваемых деталей; величина осевого усилия при нагреве; величина осадки при нагреве; величина осевого усилия проковки; длительность приложения усилия проковки.

Первые два параметра определяют мощность нагрева, а в сочетании с третьим — величину введенной энергии при нагреве; два последних параметра ответственны (вместе с тремя первыми) за качество сварного соединения.

Величину осадки при нагреве нередко заменяют длительностью нагрева, так как эти величины практически прямо пропорциональны.

Усилия нагрева и проковки обычно задаются в виде удельных давлений, так как установлено, что их оптимальные значения прямо пропорциональны площади поперечного сечения свариваемых деталей в месте сварки; величину же полного осевого усилия определяют как произведение этой площади на удельное давление.

Численные значения основных параметров процесса зависят от свойств материалов свариваемых деталей и от размеров их сечений; они определяются экспериментально и сведены в технологические таблицы режимов сварки трением, которые приводятся в соответствующих разделах справочника.

Примерные режимы, обычно применяемые для сварки трением заготовок из малоуглеродистой и среднеуглеродистой стали, приведены в табл. 10.

10. Режимы сварки трением заготовок из стали

Диаметр заготовки, мм	Основные параметры процесса					Дополнительные сведения	
	Частота вращения, об/мин	Осевое усилие, кгс		Время, с			
		Нагрев	Проковка	Нагрев	Проковка	Потребляемая мощность, кВт	Машинное время процесса, с
20	1000	1 500	3 000	5—6	1,5	4	6,5—7,5
50	400	10 000	20 000	20	2,0	25	22

Основные преимущества и недостатки. Преимущества. Строго локализованное тепловыделение в приповерхностных слоях деталей при сварке трением является главной особенностью этого процесса, предопределяющей его энергетические и технологические преимущества, к которым в первую очередь относятся следующие.

Высокая производительность. Объем тонкого слоя нагреваемого металла настолько незначителен, что весь цикл его нагрева обычно укладывается в весьма малый промежуток времени — от нескольких секунд до 0,5 мин (в зависимости от свойств материала и размеров сечения свариваемых деталей); это определяет высокую производительность процесса сварки трением; конкурировать с нею в этом отношении может лишь электрическая контактная стыковая сварка.

Высокие энергетические показатели процесса. Локальное генерирование тепла и малые объемы нагреваемого при сварке трением металла обусловливают весьма высокий коэффициент полезного действия процесса сварки трением;

расход энергии и мощности при сварке трением в 5—10 раз меньше, чем, например, при электрической контактной сварке встык (рис. 37).

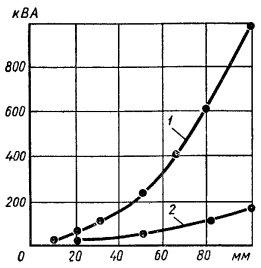


Рис. 37. Мощность, потребляемая из сети, в зависимости от диаметра свариваемых заготовок:

1 — при электрической контактной стыковой сварке; *2* — при сварке трением

Высокое качество сварного соединения. При правильно выбранном режиме сварки металл стыка и прилегающих к нему зон обладает прочностью и пластичностью, не меньшими, чем основной металл соединяемых деталей; стык свободен от пор, раковин, различного рода инородных включений и других макропороков, а металл стыка и зон термического влияния в результате ударного термомеханического воздействия (быстрые нагрев и охлаждение в присутствии больших — в несколько сотен атмосфер — давлений), по своему характеру близкого к режимам термомеханической обработки металлов, приобретает равноосную и сильно измельченную структуру (рис. 38).

Стабильность качества сварных соединений. Детали, сваренные трением при одном и том же режиме, отличаются повторяемостью механических свойств; варьирование временного сопротивления, угла изгиба, величины ударной вязкости и других показателей в партии деталей, сваренных на неизменном режиме, не превышает 7—10%. Это позволяет обоснованно применять выборочный контроль качества партии деталей, что особенно важно при отсутствии в настоящее время простых, надежных и дешевых методов неразрушающего контроля стыковых соединений, пригодных для использования в условиях сварочных цехов.

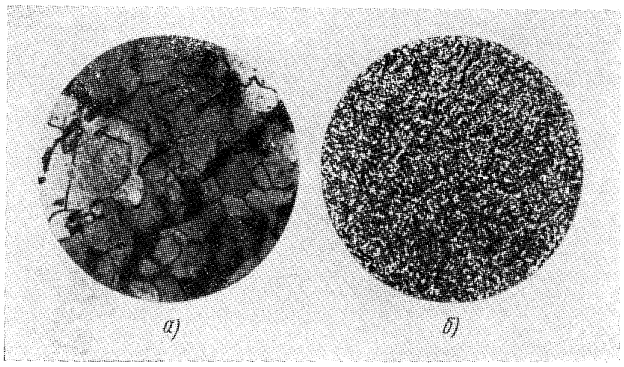


Рис. 38. Микрофотография структуры (×300):

а — основного металла (низкоуглеродистая сталь); *б* — металла стыка (сварка трением)

Независимость качества сварных соединений от чистоты их поверхности. При сварке трением нет необходимости в зачистке перед началом процесса вводимых в контакт поверхностей; в отличие, например, от контактной сварки боковые поверхности деталей также могут оставаться неочищенными, что в значительной мере экономит время вспомогательных операций.

Возможность сварки металлов и сплавов в различных сочетаниях. Процесс сварки трением позволяет выполнять прочные соединения не только одноименных, но и разноименных металлов и сплавов, причем даже таких, которые другими способами сварки либо вовсе не получаются, либо их получение сопряжено с большими трудностями. Изучены и освоены в промышленном производстве такие, например, сочетания разноименных материалов, как алюминий со сталью, медь со сталью, титан с алюминием, медь с алюминием и другие.

Гигиеничность процесса. Сварку трением от других видов сварки выгодно отличает гигиеничность процесса: отсутствие ультрафиолетового излучения, вредных газовых выделений и горячих брызг металла.

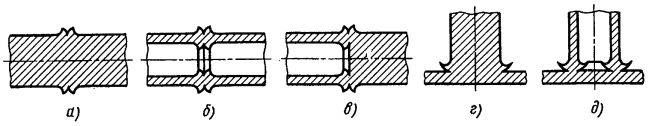


Рис. 39. Типы соединений, выполняемых с помощью сварки трением:

а — стержня встык; *б* — трубы встык; *в* — трубы со стержнем встык; *г* и *д* — Т-образные соединения стержня и трубы с плоской поверхностью контрдетали

Простота механизации и автоматизации. Сварку трением выполняют на специальных машинах; основные параметры процесса сравнительно легко программируются, и, как правило, все оборудование представляет собой либо полуавтоматы с минимальным использованием ручного труда, либо автоматы, работа которых протекает без участия человека.

Недостатки. *Сварка трением не является универсальным процессом.* С ее помощью могут осуществляться соединения лишь таких пар деталей, из которых хотя бы одна является телом вращения (круглый стержень или труба), ось которого совпадает с осью вращения; при этом другая деталь может быть произвольной формы, но должна иметь плоскую поверхность, к которой приваривается первая деталь. На рис. 39 показаны основные варианты соединений.

Этот недостаток, однако, несущественно ограничивает применяемость сварки трением; анализ характера производства показывает, что в машиностроительных отраслях промышленности количество деталей круглого сечения составляет до 50—70% от общего числа свариваемых деталей.

Некоторая громоздкость оборудования, в результате чего процесс не может быть мобильным; процесс осуществим лишь при условии подачи заготовок, подлежащих сварке, к машине (приварка малых деталей к массивным конструкциям с помощью переносных машин исключается).

Искривление волокон текстуры проката в зоне пластического деформирования — волокна близ стыка располагаются в радиальных направлениях и выходят на наружную (боковую) поверхность сваренной детали. В деталях, работающих в условиях динамических нагрузок, стык с таким расположением волокон может оказаться очагом усталостного разрушения, а в других деталях, работающих в агрессивных средах, — очагом коррозии. Лучшим средством предотвращения указанных дефектов является сохранение на детали грата. Другие средства борьбы с этими нежелательными явлениями могут значительно увеличить стоимость изготовления детали.

Следует также указать на неудобства, связанные с необходимостью съема грата, когда это по конструктивным соображениям оказывается необходимым. На это затрачивается добавочное время либо на сварочной машине, либо на отдельном рабочем месте.

Особенности образования соединения при сварке трением. Несмотря на кажущуюся простоту, процесс сварки металлов трением в действительности весьма сложен и многообразен; он подчинен многим закономерностям, так как в нем соседствуют и взаимодействуют такие явления, как тепловыделение и износ поверхностей при трении; непрерывное образование и немедленное же разрушение металлических связей между сопряженными поверхностями в процессе их относительного движения; почти мгновенный нагрев и очень быстрое охлаждение

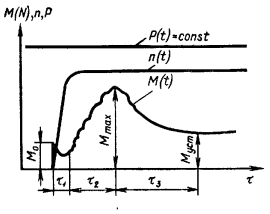


Рис. 40. Изменение момента сил M (t) в процессе сварки трением

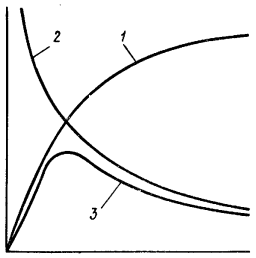


Рис. 41. Максимум кривой моментов (*3*), как результат нарастания числа «схватываний» *1* и спада *2* прочности «мостиков» в связи с ростом температуры

малых объемов металла в присутствии очень больших (достигающих тысячи атмосфер) удельных давлений; упругопластические деформации в микрообъемах выступов шероховатых поверхностей и в макрообъемах слоев металла, прилегающих к этим поверхностям; наклеп и рекристаллизация металла; взаимная диффузия, а также внедрение макроскопических частиц металла одной из свариваемых деталей в тело другой и др.

Теория сварки трением сложна и далеко еще не разработана. Однако выполненные уже исследования позволяют представить качественную картину явлений, происходящих в стыке при сварке.

На рис. 40 показана характерная (экспериментальная) кривая изменения момента сил трения M во времени (так как частота вращения n на протяжении процесса постоянна, то эта кривая в ином масштабе характеризует изменения потребляемой мощности, а площадь, ограниченная ею, соответствующими ординатами и осью абсцисс, — затраченную энергию). Процесс начинается трением покоя M_0, затем (в фазе τ_1) имеет место граничное трение, в результате которого температура поверхностей трения в отдельных точках повышается, эти точки очищаются от окисных и жировых пленок, металл пластифицируется, и между поверхностями трения образуются металлические связи — мостики «схватывания». В процессе продолжающегося относительного движения поверхностей трения эти связи разрушаются, на что расходуется дополнительная энергия. Возрастание в фазе τ_2 момента (и мощности) трения характеризует вначале бурно растущий процесс увеличения числа мостиков схватывания на поверхностях трения; при этом возрастает и средняя температура; скорость этого процесса со временем

затухает (кривая *1* на рис. 41). С ростом температуры возникает другой процесс, характеризующийся кривой *2* на рис. 41, — процесс уменьшения прочности металла и сопротивления мостиков разрушению. Произведение этих двух функций (их считают близкими к экспонентам) обусловливает наличие максимума (кривая *3* на рис. 41); этим обусловлен и максимум на кривой моментов, после которого начинается спад значений моментов (фаза τ_3) до некоторого установившегося значения. В начале этой фазы появляется интенсивное макродеформирование поверхностей свариваемых деталей с вытеснением металла из стыка в грат и соответственно — сближением деталей в осевом направлении (так называемая осадка нагрева). При достижении моментом сил установившегося значения скорость осадки тоже стабилизируется, и наступает «квазистационарное» состояние, начало которого является основанием для прекращения *стадии нагрева*.

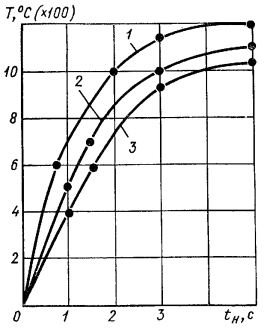


Рис. 42. Изменение во времени температуры в стыке $T°$ (t) в точках поверхности трения, различно удаленных от оси вращения:

1) ρ = 8,5 мм; *2*) ρ = 5 мм; *3*) ρ = 0. Режим сварки: стержни из низкоуглеродистой стали, ⌀ 20 мм, частота вращения 1000 об/мин, давление нагрева 5 кгс/мм².

К этому моменту металл стыка полностью подготовлен к образованию сварного соединения, но пока продолжается вращение одной детали относительно другой, соединение возникнуть не может. Как только прекращается движение (возникшие уже ранее металлические связи более не разрушаются), начинается образование сварного соединения. По аналогии с кузнечной (горновой) сваркой, нагретый и готовый к свариванию металл необходимо подвергнуть «*проковке*», т. е. обжать его осевым усилием. Эта, четвертая фаза *(вторая стадия)* процесса наступает тотчас же после прекращения вращения и продолжается обычно несколько секунд, пока металл стыка не остынет до нижней границы ковочных температур.

Осевое усилие проковки может быть равно усилию при нагреве, но может быть и (во многих случаях, в особенности, когда сварке подвергаются материалы пониженной пластичности) увеличено. Чаще всего усилие проковки выбирают вдвое большим, нежели усилие нагрева.

Совместное пластическое деформирование металла свариваемых деталей и его течение в плоскости стыка как в стадии нагрева, так и в стадии проковки является одним из основных условий образования прочного соединения.

Пластическая деформация металла в микрообъемах имеет важное значение для течения процесса; благодаря этому явлению происходит перераспределение удельных давлений по сечению в стадии нагрева: нагревшийся металл менее сопротивляется деформированию, чем более холодный, поэтому действующее осевое усилие воспринимается более холодными участками поверхностей трения, вследствие чего они быстрее нагреваются и деформируются. Этим объясняется и то обстоятельство, что участки поверхности трения, расположенные близ оси вращения, температура которых должна была бы быть минимальной, быстро нагреваются почти до тех же температур, что и периферийные участки поверхностей трения (рис. 42).

Область применения. Форма и размеры сечения. Сварка трением (основная и наиболее распространенная схема процесса) применяется для соединения деталей встык (при этом или обе, или одна из них должны в месте сварки иметь круглое сечение) и для образования Т-образных соединений круглой детали «впритык» к плоской поверхности.

Принципиально размеры сечения свариваемых деталей не ограничены, однако существуют их рациональные пределы; мировая практика использования сварки трением не знает пока случаев соединения стержней диаметром $<0{,}75$ мм; не известны и случаи сварки деталей сплошного сечения диаметром >200 мм.

В СССР сварка трением в промышленном производстве используется для соединения деталей сечением 50—10 000 мм². Эти пределы определяются номинальной мощностью ($N_н$) и максимальным значением осевого усилия ($P_{ос}$) используемой машины в соответствии со следующими выражениями:

$$S_{max} = \frac{N_н}{N_{уд}} \text{ и } S_{max} = \frac{P_{ос}}{P_{уд}}.$$

Этими же выражениями можно пользоваться при выборе требуемого оборудования по заданным размерам деталей и свойствам материала, из которого они изготовлены (употребительные значения $N_{уд}$ и $P_{уд}$ приведены в соответствующем разделе справочника).

Материалы. Накоплен большой опыт промышленного использования сварки трением различных одноименных материалов, а также разноименных металлов и сплавов. Хорошо свариваются черные металлы (исключением является чугун).

Равнопрочные соединения получаются при сварке одноименных малоуглеродистой, среднеуглеродистой, низко- и среднелегированной сталей; хорошо сваривается жаропрочная сталь. Хорошо свариваются стали всех названных выше классов в различных сочетаниях между собой, а также быстрорежущая сталь марок Р9 и Р18 с конструкционной сталью марок 40 и 40Х (и близких к ним).

Представляет некоторые технологические затруднения сварка таких разноименных материалов, как быстрорежущая сталь повышенной теплостойкости с конструкционной; трудно свариваются и требуют форсированных режимов тепловыделения некоторые жаростойкие сплавы дисперсионного твердения с конструкционной сталью.

Хорошо свариваются алюминий со всеми его сплавами, медь, латунь и другие одноименные цветные металлы.

Прочные и пластичные соединения образуются при сварке трением алюминия с медью, меди со сталью, алюминия со сталью. Плохо сваривается сталь с алюминиевыми сплавами, содержащими более 3% легирующих компонентов.

Прочностные свойства соединений. Лабораторные исследования, подтвержденные многолетним эксплуатационным опытом, показали, что при правильно выбранных режимах сварка трением позволяет получать соединения, равнопрочные основному металлу. Статическая прочность при растяжении и загибе, относительное удлинение, ударная вязкость, усталостная прочность, т. е. почти все основные механические показатели металла стыка, находятся на уровне соответствующих показателей основного металла деталей или близки к ним.

Это позволило использовать сварку трением при промышленном производстве самых различных изделий, в том числе и весьма ответственных.

Отрасли производства. Сварка трением широко внедрена в ведущих отраслях производства при изготовлении:

в автомобилестроении — деталей рулевого управления, карданных валов легковых и грузовых автомобилей, полуосей, картеров задних мостов автомобилей, клапанов двигателей внутреннего сгорания, цилиндров гидросистем и др.;

в тракторостроении — деталей рулевого управления, планетарных передач, валов отбора мощности, катков, траков, роторов турбонагнетателей дизельного двигателя и др.;

в электропромышленности — деталей высоковольтной аппаратуры, выводов бумагомасляных конденсаторов, кислотных аккумуляторов и анодов игнитронов, поршней пневмоцилиндров сварочных машин и др.;

в инструментальном производстве — при массовом изготовлении концевого режущего инструмента (фрезы, сверла, метчики).

На рис. 43 и 44 показаны некоторые характерные случаи применения сварки трением.

Наиболее эффективные направления использования: при изготовлении круглых деталей ступенчатого по длине профиля путем их сварки из заготовок разного диаметра; при изготовлении составных деталей из разных материалов с целью экономии более дорогого или дефицитного из них; при изготовлении сварно-штампованных, сварно-кованых и сварно-литых деталей; при конструировании деталей специально под сварку трением, с учетом ее особенностей и возможностей.

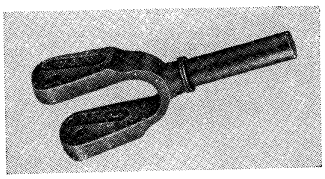


Рис. 43. Вилка тяги. Сталь. Сварено трением (поковка + прокат). Диаметр стержня 30 мм

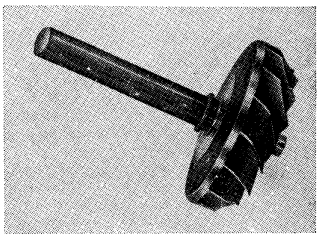


Рис. 44. Ротор турбонагнетателя. Сварка трением. Колесо из жаропрочной аустенитной стали, вал — из перлитной стали. Диаметр в месте сварки 20 мм.

Оборудование. Принципиально сварку трением можно вести на любом металлорежущем станке, имеющем патрон на вращающемся шпинделе для закрепления одной из свариваемых деталей и место для установки второй детали (токарный, фрезерный, расточной, сверлильный и т. п. станки), однако попытки использования металлорежущих станков для сварки трением приводят, как правило, к их быстрому износу; эти станки не рассчитаны на режимы, свойственные сварке трением; выходят из строя подшипниковые группы станков, ломаются станины.

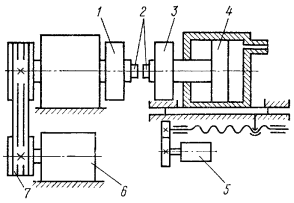


Рис. 45. Принципиальная кинематическая схема машины для сварки трением:

1 и *3* — зажимы; *2* — заготовки; *4* — силовой привод; *5* — механизм установочного перемещения заготовок до упора; *6* — двигатель; *7* — привод вращения

Для сварки трением необходимо использовать специальные машины. Принципиальная кинематическая схема такой машины показана на рис. 45. Машина снабжена схемой управления, связывающей работу всех ее узлов в единый цикл.

Большинство действующих в настоящее время машин для сварки трением представляют собой полуавтоматы, которые весь этот цикл выполняют автоматически, и лишь укладка свариваемых заготовок в зажимы машины и извлечение сваренной детали в них выполняются вручную. В крупных машинах, предназначенных для сварки тяжелых деталей, вспомогательные операции обычно механизированы. За последние годы в ряде стран стали появляться машины-автоматы

с полностью автоматизированным (включая и вспомогательные операции) циклом работы.

До начала 70-х годов почти все машины для сварки трением были универсальными и рассчитаны на сварку большого числа различных по форме и размерам деталей. В настоящее время наметилась тенденция создания специализированного оборудования для сварки трением; в этом случае каждая машина предназначена для сварки какой-либо одной или группы однотипных деталей. Такие машины более высокопроизводительны и в подавляющем большинстве работают в полностью автоматизированном цикле. Начинают находить применение комплексные механизированные и автоматические линии, построенные на базе машин для сварки трением и выполняющие как операции сварки, так и ряд смежных операций — механическую обработку до сварки, снятие грата после сварки и даже иногда контроль качества выполненного соединения. Эти наиболее высокопроизводительные агрегаты весьма перспективны и в ближайшие годы найдут широкое применение.

Тем не менее простые, дешевые и удобные в эксплуатации машины универсального применения хотя и не отличаются высокой производительностью, до настоящего времени успешно применяются при выполнении ремонтных работ, а также в небольших производственных цехах с развитым ассортиментом обрабатываемых деталей.

Подробные сведения об оборудовании для сварки трением приведены в соответствующем разделе справочника. Здесь для общей ориентировки сообщаются некоторые технико-экономические показатели лишь одного из полуавтоматов, выпускаемых серийно в СССР (рис. 46): номинальная мощность — 22 кВт; максимальное осевое усилие 10 000 кгс; диапазон диаметров свариваемых заготовок 16—36 мм; машинное время сварки 10—30 с; масса машины 2700 кг; габаритные размеры в плане 720 × 1800 мм; высота 1300 мм.

Разновидности сварки трением. Инерционная сварка была изобретена в США и широко там распространена. Инерционная сварка отличается от

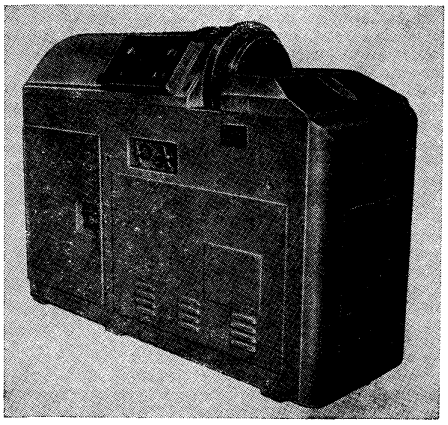


Рис. 46. Полуавтомат для сварки трением типа МСТ-35-5 (ВНИИЭСО)

обычного способа сварки трением лишь тем, что потребляемая из электрической сети энергия, преобразованная электродвигателем в механическую энергию, поступает к месту сварки не непосредственно, а предварительно (в промежутках между сварками) аккумулируется в маховике машины. Эта особенность процесса позволила своеобразно решить некоторые вопросы технологии и конструкцию оборудования.

Процесс инерционной сварки заранее закрепленных в зажимах подлежащих сварке заготовок начинается с того, что маховик машины с помощью электродвигателя приводится во вращение. По мере нарастания угловой скорости маховика в нем нарастает запас кинетической энергии $Э_к$, величина которого определяется из уравнения

$$Э_к = \frac{J\omega^2}{2},$$

где J — момент инерции маховика и связанных с ним вращающихся частей машины; ω — угловая скорость маховика.

Когда накопленная энергия достигнет заданной величины $Э_{max}$, необходимой и достаточной для сварки деталей, а угловая скорость достигнет соответственно величины

$$\omega_{max} = \sqrt{\frac{2Э_{max}}{J}},$$

специальное устройство, реагирующее на величину угловой скорости, сработает и пошлет сигнал на механизм, подключающий шпиндель машины к вращающемуся маховику и отключающий маховик от приводного двигателя.

Одна из свариваемых деталей при этом приводится во вращение; если детали предварительно были прижаты осевым усилием одна к другой, то в стыке начинается процесс тепловыделения. Момент сил трения $M_т$ в стыке является единственным (если не считать потерь на трение в узлах машины) тормозным моментом в системе, и, следовательно, им определяется тормозной путь («выбег»)

$$\alpha \approx \frac{\omega_{max} t_{св}}{2}$$

и длительность торможения (сварки) $t_{св}$; работа трения может быть записана в виде

$$Э_к = k\alpha M_т = k\frac{J\omega^2}{2}.$$

Совместное решение приведенных выражений позволяет определить время сварки как

$$t_{св} = k\frac{J\omega}{M_т},$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Таким образом, режим сварки данных деталей при уже выбранном для них маховике однозначно определяется лишь двумя параметрами процесса — величиной запасенной энергии и моментом трения в стыке, или иначе — начальной угловой скоростью маховика ω_{max} и усилием P (удельным давлением) сжатия деталей.

Как видно из рис. 47, время нагрева при инерционной сварке в несколько раз меньше, чем при обычной сварке трением, что является основной особенно-

стью этой разновидности сварки, определяющей ее технологические преимущества; так, например, кратковременный цикл нагрева-охлаждения позволяет с помощью инерционной сварки соединять такие разнородные материалы, как титан с алюминием и другие сочетания, в то время как при обычной сварке трением это в ряде случаев невыполнимо. Следует, однако, отметить, что в некоторых случаях эта особенность инерционной сварки оказывается вредной: при соединении материалов, склонных к образованию закалочных структур, например быстрорежущей стали с конструкционной, вследствие быстротечности термического цикла соединения получаются хрупкими, в них возможно образование закалочных трещин.

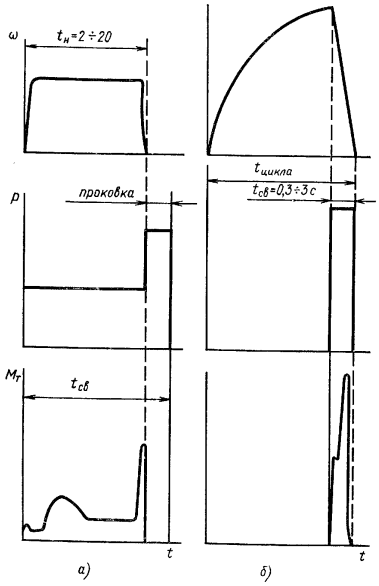


Рис. 47. Циклограммы процесса сварки трением:

а — обычной; *б* — инерционной

Значительное сокращение машинного времени инерционной сварки по сравнению с обычной сваркой трением не означает, однако, что производительность процесса также резко возрастает; при одинаковой мощности, потребляемой из сети машинами, и при сварке идентичных заготовок время одного цикла сварки в обеих сравниваемых разновидностях сварки трением практически одинаково, так как при инерционной сварке в качестве составляющей в него входит достаточно большое время разгона тяжелого маховика.

Отрицательной особенностью машин для инерционной сварки следует считать ведение процесса на повышенных угловых скоростях при больших осевых усилиях, что требует применения тяжелых подшипниковых узлов и зажимов, выдерживающих большие радиальные усилия. В результате машины для инерционной сварки сложнее, тяжелее и дороже машин для обычной сварки трением, а так как они не отличаются существенно повышенной производительностью, целесообразность их использования ограничивается теми случаями, когда соединяют материалы в сочетаниях, не сваривающихся обычным способом сварки трением (алюминий — титан и др.)

Орбитальная сварка является разновидностью сварки трением и отличается тем, что она позволяет осуществлять соединение не только круглых заготовок, но также и заготовок любой произвольной формы сечения. Это достигается путем вращения обеих свариваемых заготовок с одинаковой угловой скоростью в одну и ту же сторону (синхронно и синфазно). При этом, даже если торцы заготовок и были прижаты один к другому, силы трения между ними возникнуть не могут, до тех пор, однако, пока оси вращения обеих заготовок совпадают. Достаточно одну из них сместить параллельно самой себе на некоторую

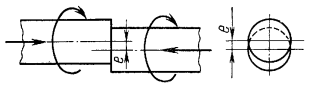
величину эксцентриситета *e*, как тотчас же в стыке возникнет трение, начнется тепловыделение и т. д.

Эта схема процесса (рис. 48) отличается от других разновидностей сварки трением тем, что каждая точка на торце одной из свариваемых заготовок описывает окружности относительно соответствующей точки на торце второй заготовки с угловой скоростью, равной угловой скорости заготовок. Следовательно, мощность тепловыделения на всей поверхности трения постоянна и определяется, как обычно, величиной удельного давления, которая в данном случае может быть найдена из выражения

$$v = \frac{\pi e n}{60},$$

а ее численные значения должны лежать в пределах, обычных для сварки трением — от 0,5 до 2 м/с (для черных металлов и алюминия). Процесс тепловыделения завершается в результате принудительного совмещения осей все еще вращающихся заготовок; в то же время к свариваемым заготовкам прикладывается проковочное давление, и их совместное вращение прекращается; к моменту полной остановки деталь оказывается сваренной.

Рис. 48. Схема процесса орбитальной сварки



Кроме названной особенности — возможности сварки деталей некруглого сечения, орбитальная сварка обладает другим важным преимуществом — повышенной производительностью.

При орбитальной сварке нет необходимости оси свариваемых деталей совмещать с осью вращения, и, следовательно, вместо одной пары заготовок на планшайбах, смонтированных на шпинделях машины, на разном удалении от оси вращения могут быть закреплены и одновременно свариваться не одна пара заготовок, а несколько таких пар; при этом мощность машины и величина осевого усилия должны быть соответственно увеличены.

Орбитальной сваркой благодаря синхронности вращения заготовок можно осуществлять соединение таких заготовок, которые после сварки должны быть строго сориентированы по углу поворота.

Процесс орбитальной сварки пока еще не нашел промышленного применения, что, вероятно, объясняется недостаточной популяризацией возможностей орбитальной сварки.

Другие разновидности процесса сварки трением. Сварка двух деталей с помощью третьего тела. Соединение длинных (или коротких, но массивных) деталей с помощью сварки трением осложнено тем, что приведение во вращение и быстрое торможение таких деталей сопряжено со значительными трудностями. В этом случае может быть успешно применена схема процесса (разновидность) сварки трением, позволяющая осуществлять сварку двух неподвижных деталей с помощью вращения зажатого между ними третьего тела. В качестве такого третьего тела может быть использован тонкий диск с диаметром большим, нежели диаметр свариваемых заготовок (рис. 49), для удобства захвата диска зажимом либо (рис. 49, *а*) относительно длинная в осевом размере вставка, диаметр которой может быть таким же, как и диаметр подлежащих соединению заготовок.

Одновременная сварка трех заготовок — нередко применяемый прием — с целью увеличения производительности труда одновременно свариваются три заготовки, причем средняя (рис. 49, *в*) в процессе сварки остается

неподвижной, а обе крайние приводятся во вращение с помощью двух отдельных шпинделей; вращение крайних заготовок может быть синхронизировано и синфазировано, если требуется взаимная ориентация деталей по углу поворота либо вращение обоих шпинделей осуществляется без применения синхронизаторов.

В и б р а ц и о н н а я с в а р к а. Принципиально возможен процесс сварки трением некруглых деталей, при котором вместо относительного вращения используется возвратно-поступательное движение торца одной из свариваемых заготовок относительно другой (рис. 49, *г*). Практически эта схема процесса не нашла применения, так как сварочная установка получается очень неэкономичной: большая доля вводимой в машину энергии растрачивается бесполезно на преодоление сил инерции и на износ частей и деталей самой машины; при необходимости соединять трением детали некруглой формы правильнее обращаться к орбитальной сварке.

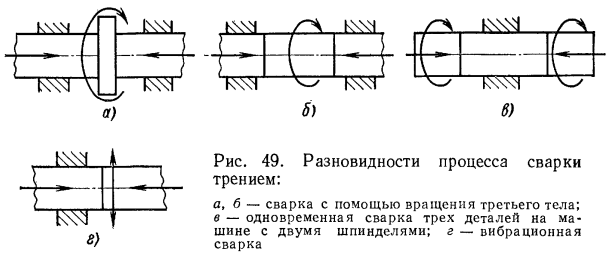


Рис. 49. Разновидности процесса сварки трением:

а, *б* — сварка с помощью вращения третьего тела; *в* — одновременная сварка трех деталей на машине с двумя шпинделями; *г* — вибрационная сварка

Перспективы развития сварки трением. За сравнительно короткое время промышленного использования сварка трением зарекомендовала себя как высокопроизводительный технологический процесс, позволяющий получать высококачественные соединения деталей из большого числа различных одноименных и разноименных металлов и сплавов и обладающий рядом других важных преимуществ. Это одна из основных причин быстрого внедрения сварки трением в различных отраслях машиностроения. Особенности процесса позволяют прогнозировать следующие пути дальнейшего развития сварки трением:

разработка новых разновидностей процесса сварки трением с целью расширения возможностей его промышленного использования;

выполнение технологических исследований в области расширения номенклатуры свариваемых трением новых материалов и установления оптимальных режимов их сварки;

разработка новых образцов и систем универсального оборудования для сварки крупных деталей, а также для микросварки трением;

создание простых и дешевых универсальных машин для оснащения ими ремонтных мастерских и производственных цехов с большой номенклатурой обрабатываемых деталей;

создание специализированных машин-автоматов и комплексных линий, предназначенных для изготовления большого числа однотипных деталей;

создание оборудования, оснащенного системами обратных связей и ведущего процесс сварки в заданном режиме, без отклонений при воздействии возмущающих факторов, что полностью исключает возможность брака при сварке;

выполнение исследований в области оптимизации процесса и создание (в перспективе) на этой базе самонастраивающихся машин-автоматов, снабженных компьютерами или подключаемых к ним.

ДИФФУЗИОННАЯ СВАРКА

Особенности диффузионной сварки. Способ диффузионной сварки на современной стадии развития имеет важное народнохозяйственное значение. Он позволил решить ряд сложных технических проблем, создать новые образцы современной техники, новые сложные и точные конструкции приборов и изделий различного назначения. В то же время диффузионное соединение является экономически эффективным технологическим процессом. Он не требует дорогостоящих припоев, специальной сварочной проволоки и электродов. В большинстве случаев отпадает необходимость в последующей механической обработке, отсутствуют дополнительные потери металла, вес конструкции не увеличивается, снижаются эксплуатационные расходы. Способ диффузионного соединения обеспечивает высокое качество изделий, повышает их надежность, позволяет увеличить ресурс работы. Способ предложен, разработан и доведен до промышленного применения проф. Н. Ф. Казаковым.

Диффузионная сварка — разновидность сварки давлением — происходит за счет взаимной диффузии атомов контактирующих поверхностей при относительно длительном воздействии повышенной температуры и незначительной пластической деформации. Если процесс соединения протекает при наличии жидкой фазы, то потребность в давлении отпадает, поскольку происходит предварительное смачивание соединяемых поверхностей жидкой пленкой.

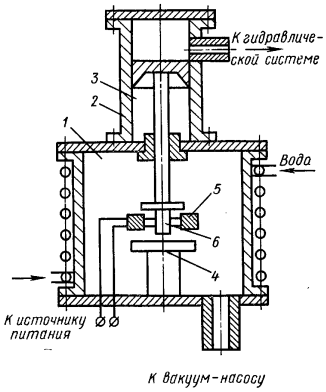


Рис. 50. Принципиальная схема установки для диффузионной сварки в вакууме:

1 — вакуумная камера; *2* — цилиндр гидропривода; *3* — поршень; *4* — стол для крепления деталей; *5* — индуктор; *6* — свариваемые детали

Сварку производят в специальных сварочных установках (рис. 50). Две части детали помещают в вакуумную камеру. Для защиты их от интенсивного окисления и азотирования в процессе разогрева и сварки в рабочей камере обеспечивается вакуум. Источником нагрева служит высокочастотный генератор, сжимающее усилие обеспечивается гидросистемой. После сварки детали охлаждаются в вакуумной камере до комнатной температуры.

При этом способе сварки образование соединения зависит от температуры, давления и времени выдержки.

Температура сварки для однородных металлов, как правило, должна составлять 0,5—0,7 от температуры плавления металла или сплава, а при сварке разнородных — 0,5—0,7 от температуры плавления металлов с более низкой температурой плавления. Такая температура необходима для ускорения взаимной диффузии атомов материалов через поверхность стыка и для обеспечения некоторого размягчения металла, которое способствует более легкому протеканию деформации, смятию неровностей поверхности.

Давление служит одной главной цели — обеспечению плотного контакта поверхностей, подлежащих соединению. Величина давления должна быть достаточной, чтобы в результате деформации поверхностей соединяемых деталей все пустоты в области стыка были заполнены. Если давление недостаточно, то пустоты

сохраняются, значительно снижая прочность соединения. При деформировании поверхностных слоев происходит разрушение поверхностных окислов, что обеспечивает контакт ювенильных поверхностей.

Время выдержки при заданных температуре и давлении в большинстве случаев должно быть минимальным, что обосновано как физико-механическими, так и экономическими соображениями. Для получения прочного соединения время сварки определяется установлением плотного контакта между соединяемыми поверхностями и минимальной диффузией атомов через поверхность соединения. Значительная диффузия может привести к образованию пустот в зоне соединения, а при сварке разнородных металлов и сплавов в ряде случаев к образованию интерметаллических фаз.

Диффузионная сварка наилучшим образом протекает при вакууме, не хуже при разрежении 10^{-2} мм рт. ст. или в атмосфере инертного газа; иногда применяют водород.

Для сварки необходим хороший контакт, поэтому поверхности изделий должны быть гладкими и плотно прилегать друг к другу.

Пластичные металлы (алюминий, медь, магний, олово и золото), которые легко деформируются, не требуют особой подготовки соединяемых поверхностей перед сваркой. Твердые материалы (твердые сплавы, тугоплавкие металлы, жаропрочные сплавы, инструментальная сталь и неметаллические материалы требуют особой обработки соединяемых поверхностей. В этом случае поверхность должна быть обработана по 6-му классу шероховатости.

ГОСТ 2601—74 и 19521—74 установлены термины, определяющие сущность и понятие диффузионной сварки в вакууме. IV Комиссия Международного института сварки (МИС) приняла определение диффузионной сварки в следующей редакции:

«Диффузионная сварка в твердом состоянии — способ получения монолитного соединения, образовавшегося вследствие возникновения связей на атомарном уровне, появившихся в результате максимального сближения контактных поверхностей за счет локальной пластической деформации при повышенной температуре, обеспечивающей взаимную диффузию в приповерхностных слоях соединяемых материалов».

Диффузионная сварка имеет ряд важных преимуществ по сравнению со сваркой и пайкой, среди которых можно выделить следующие:

1. Высокое качество сварного соединения. При этом соединение сохраняет свойства, присущие свариваемым металлам и сплавам. При правильно выбранном режиме (температуре, давлении и времени сварки) металл соединения и прилегающих к нему зон имеет высокую прочность и пластичность. В сварном соединении отсутствуют непровары, поры, окисные включения и другие дефекты. Способ диффузионной сварки в вакууме не требует дорогостоящих припоев (золота, платины, серебра и т. п.), специальной проволоки, электродов и флюсов, а также защитных газов (аргона, гелия, водорода).

2. Постоянство качества соединений по таким показателям, как сопротивление разрыву, угол изгиба, ударная вязкость, вакуумная плотность и т. п. Колебания значений показателей не превышают 2—5%. Это объясняется возможностью точно выдержать основные параметры процесса (температуру, давление и время сварки), а также тем, что свойства сварного соединения практически не зависят от таких факторов, как колебания напряжения в питающей сети, качество вспомогательных материалов, квалификация и степень утомляемости сварщика и т. п., которые имеют существенное значение при других видах сварки.

Производственный опыт показал, что диффузионная сварка позволила создавать прочные соединения не только однородных, но и разнородных металлов и сплавов, в том числе и таких, теплофизические характеристики которых резко различны. Это, по-видимому, единственный надежный способ соединения материалов, малопластичных, тугоплавких, нерастворимых друг в друге или образующих между собой при сварке плавлением хрупкие интерметаллические соединения. С помощью диффузионной сварки получены соединения таких пар металлов и

сплавов, выполнить которые другими видами сварки невозможно (например, титан с коррозионно-стойкой сталью, титан с алюминием, сталь с чугуном, медь с молибденом, вольфрам с ниобием и др.).

Стало возможным получение изделий таких форм, которые не могли быть получены ранее или стоимость производства которых обычными методами была слишком высокой. Допуски на размеры деталей, полученных диффузионной сваркой, в большинстве случаев не превышают допуски при механической обработке. Диффузионная сварка позволила получить детали очень сложной конструкции — пустотелые с несимметричной формой, со сложной кривизной — без использования крепежных элементов и сверления отверстий для их установки. Исключение большей части крепежных элементов уменьшает склонность конструкции к коррозии под напряжением для изделий с большим сроком службы.

3. Поскольку диффузионная сварка происходит при температуре 0,5—0,7 от температуры плавления металла в течение малого промежутка времени (1—5 мин), расход энергии и мощность, потребляемая на сварку в 4—6 раз меньше, чем, например, при контактной сварке.

4. Диффузионная сварка гигиенична; отсутствуют ультрафиолетовое излучение, вредные газовые выделения, горячие брызги металла, мелкодисперсная пыль, что весьма важно для охраны здоровья работающих.

5. Основные параметры диффузионной сварки (температура, давление, вакуум и время сварки) легко программируются. Как правило, оборудование для диффузионной сварки, применяемое в промышленности, представляет собой либо полуавтоматы с минимальным использованием ручного труда, либо автоматы, работа которых протекает практически без участия человека.

С целью повышения коэффициента использования рабочего объема камеры периодического действия разработаны установки для сварки изделий — многокамерные (роторного типа), непрерывного действия с шлюзованием изделий, со специальными загрузочными бункерами. Разработаны установки с программным устройством, с камерами, устанавливаемыми непосредственно на изделии, и др.

Диффузионной сваркой производится соединение сложных и точных конструкций аппаратов, плакированных серебром, для химической промышленности (высота 3 м, диаметр 1 8 м), металлокерамических гермовводов, узлов из феррита и металлокерамики, высокостойких штампов, упругих элементов датчиков, вольфрамовых сопл, многослойных панелей, модулей пневмоники, колес турбин радиального типа, лопаток турбин двигателей, пористых труб для химической и газовой промышленности, клапанов, гильз цилиндров двигателей и т. п.

Широкое применение нашла диффузионная сварка в электронной промышленности при изготовлении и сборке замедляющих систем, катодных ножек и других деталей и узлов электронных приборов. Технология обеспечила получение вакуумно-плотных, термостойких, вибропрочных сварных соединений при сохранении высокой точности геометрических размеров и форм изделий.

На ряде предприятий Минэлектротехпрома внедрены высокостойкие штампы для вырубки магнитопроводов электродвигателей, изготовленных диффузионной сваркой. Этот же способ позволяет успешно сваривать фольгу из никеля толщиной 3 мкм с массивной деталью, алюминиевую фольгу толщиной 8 мкм с решеткой из меди, т. е. толщины соединяемых материалов могут находиться в широких пределах — от микрометров (фольга) до нескольких метров.

Диффузионная сварка позволила в 10—12 раз повысить срок службы, качество и надежность ряда изделий, разработать принципиально новые конструкции машин и приборов, упростить технологию и заменить дефицитные и дорогостоящие материалы.

Эти и другие преимущества данного способа сварки выдвигают его в число перспективных способов соединения металлических и неметаллических материалов. Однако, как и всем существующим способам соединения, диффузионной сварке свойственны недостатки: дополнительные, но неизбежные затраты времени на операцию для откачки — вакуумирования рабочего объема камеры и необходимость в хорошей подгонке и тщательной очистке соединяемых поверхностей.

Основные параметры и рекомендуемые режимы. С помощью весьма простых приемов возможно управлять процессом сварки: температурой нагрева деталей, увеличением или уменьшением давления на поверхности контакта, понижением разрежения в рабочей камере, увеличением выдержки деталей при соответствующих температурах, различными способами подготовки соединяемых поверхностей и т. п. Установление соотношений между этими параметрами процесса сварки имеет первостепенное значение для отработки оптимальной технологии.

Зависимость прочности соединения от изменения давления выражается кривой, приведенной на рис. 51. Давление требуется для обеспечения плотного контакта свариваемых поверхностей, что необходимо для взаимного диффузион-

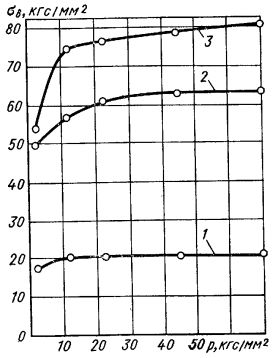


Рис. 51. Зависимость прочности сварного соединения, полученного при $B = 10^{-4}$ мм рт. ст., $\tau = 5$ мин от давления:

1 — чугун СЧ 18-36, $T = 900°$ С; *2* — сталь 50, $T = 1100°$ С; *3* — сталь 4Х14Н14В2М, $T = 1200°$ С

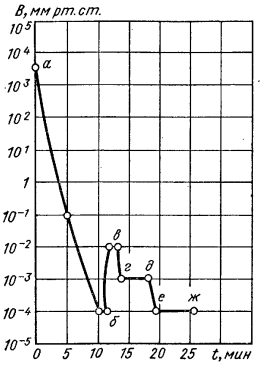


Рис. 52. Цикл изменения разрежения при сварке сплава Т15К6 со сталью 45

ного обмена атомов свариваемых материалов. Если давление при сварке меньше оптимального, то на границе соединения могут появиться непровары.

Характер изменения остаточного давления в рабочей камере в процессе диффузионной сварки показан на рис. 52. На создание высокого вакуума в камере затрачивается 10—12 мин, затем начинается нагрев свариваемых деталей. Нагрев деталей приводит к неизбежному выделению растворенных в них газов (участок *а—б*). Количество этих газов зависит от состава металла и размеров свариваемых деталей. Скорость выделения газов определяется интенсивностью нагрева. При этом давление в камере повышается (участок *б—в*).

Участок *г—д* характеризует установившееся давление в камере во время обезгаживания. Процесс обезгаживания можно ускорить за счет повышения температуры нагрева, используя более мощную откачную систему. По окончании обезгаживания происходит уменьшение остаточного давления в камере до 10^{-4} мм рт. ст. (участок *д—е*), после чего прикладывается необходимое усилие для сжатия деталей.

Участок *е—ж* характеризует процесс сварки, продолжительность которого 5—6 мин. По истечении указанного времени нагрев прекращается, давление остаточных газов в камере уменьшается. Усилие сжатия не снимается до охлаждения деталей до температуры 80—150° С. Если давление снять преждевременно, то в случае сварки разнородных металлов может произойти разрыв по линии стыка, а при сварке однородных металлов — снизится предел прочности сварного соединения.

После окончания нагрева с целью исключения окисления деталей на воздухе их следует охлаждать до определенной температуры в камере. Для деталей из черных металлов температура охлаждения не должна превышать 150—200° С, для цветных 80° С, для твердых сплавов 100° С.

Подготовка поверхности перед сваркой. Влияние способов подготовки свариваемых поверхностей на прочность соединений при диффузионной сварке исследовали экспериментально.

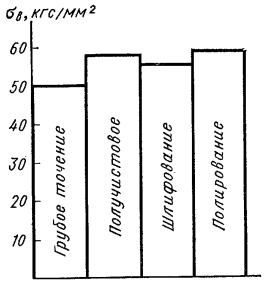


Рис. 53. Зависимость прочности соединения из стали 45 от механической обработки поверхности перед сваркой

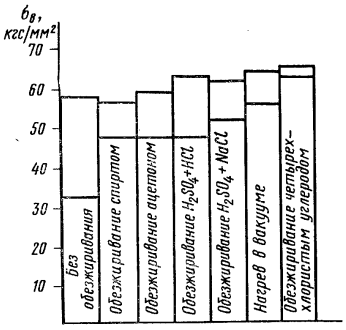


Рис. 54. Зависимость прочности сварного соединения от способа химической обработки поверхности

Сварку проводили при постоянных параметрах: $T = 1000$ °С, $p = 2$ кгс/мм² и $\tau = 5$ мин.

Соединяемые поверхности обрабатывали следующими способами: черновое точение; тонкое получистовое точение; шлифование; полирование. Диаграмма, приведенная на рис. 53, показывает, что при черновой обработке прочность получается недостаточной. При получистовом точении рельеф поверхности более гладкий, что позволило получить прочность соединения на 20% выше. При шлифовании прочность соединения оказалась на 10% меньше по сравнению с тонким получистовым точением. Возможно, при абразивной обработке на поверхность зачищенного металла попадали твердые частицы абразива, которые препятствовали диффузионным процессам.

Прочность соединения при полировании аналогична прочности при получистовом точении. Такое практическое совпадение величин прочности соединений служит хорошим доказательством того, что выбранный режим (температура, давление, длительность выдержки, разрежение) обеспечивает тесный контакт поверхностей заготовок уже при получистовом точении.

Перспективен способ очистки свариваемых поверхностей ультразвуком. Применение ультразвуковых колебаний для очистки свариваемых поверхностей повысило предел прочности сварных соединений при изгибе с 70—80 до 80—130 кгс/мм².

Другая серия экспериментов состояла в определении прочности соединения в зависимости от способов удаления с поверхности металлов окисных и адсорбированных пленок (масел, жиров, пыли, грязи, краски и т. п.), мешающих сварке.

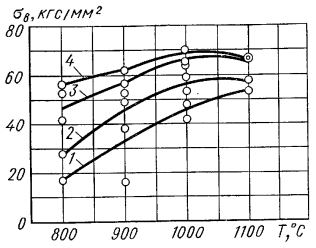


Рис. 55. Зависимость прочности сварного соединения от температуры сварки ($\tau = 5$ мин) при давлениях в процессе сварки:

1 — 0,5 кгс/мм²; *2* — 1 кгс/мм²; *3* — 2 кгс/мм²; *4* — 5 кгс/мм²

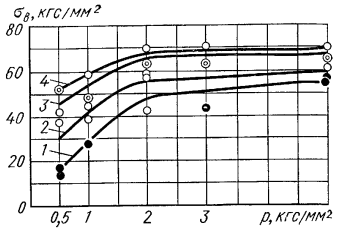


Рис. 56. Зависимость прочности соединения от давления и температуры сварки ($\tau = 5$ мин):

1) $T = 800°$ С; *2)* $T = 900°$ С; *3)* $T = 1000°$ С; *4)* $T = 1100°$ С

Жировые пленки удаляли различными способами: протиркой спиртом, ацетоном, бензином (калоша), четыреххлористым углеродом и нагревом в вакууме, травлением в кислотах.

Обезжиривание поверхности позволяет получить более высокую прочность, при обезжиривании четыреххлористым углеродом по сравнению с протиркой ацетоном прочность повышается на 14% (рис. 54); установлено, что при диффузионной сварке наблюдается очистка свариваемых поверхностей под действием нагрева в вакууме.

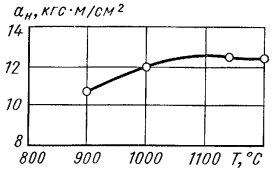


Рис. 57. Зависимость ударной вязкости соединения сплава ВТ5-1 от температуры сварки

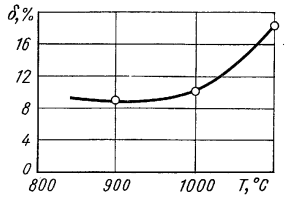


Рис. 58. Зависимость относительного удлинения соединения сплава ВТ5-1 от температуры сварки

Температура и давление при сварке. Влияние температуры в диапазоне 800—1100° С на прочность соединения выяснялось при различных давлениях (0,5; 1; 2 и 5 кгс/мм²) и продолжительности сварки 5 мин при разрежении 10^{-3} мм рт. ст. Из кривых, приведенных на рис. 55, следует, что прочность соединения при всех давлениях зависит от температуры.

При давлении 2 и 5 кгс/мм² прочность соединения увеличивается лишь для температуры 1000° С. При 1100° С наблюдается даже некоторое уменьшение прочности соединения.

При увеличении давления (рис. 56) от 0,5 до 2 кгс/мм² прочность соединения значительно растет для температур 800, 900, 1000, 1100° С. Увеличение давления от 2 до 5 кгс/мм² сказывается незначительно на прочности соединения. Изменение прочности соединения при увеличении давления до 2 кгс/мм² можно объяснить увеличением площади истинного контакта между соединяемыми поверхностями.

На рис. 57 приведены кривые зависимости ударной вязкости сварного соединения от температуры, а на рис. 58 зависимости относительного удлинения от температуры сварки. Зависимость прочности соединения от температуры и давления на примере конструкционных сталей иллюстрируется рис. 59.

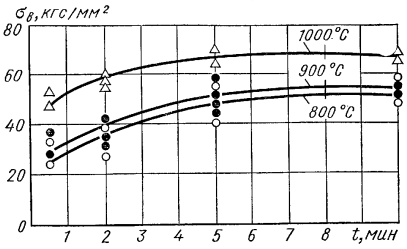


Рис. 59. Зависимость прочности образцов из конструкционной стали от времени сварки

Температура 800—900° С и давление 0,5 и 1 кгс/мм² не обеспечивают равнопрочного основному металлу соединения (разрушение происходит по месту соединения), пластичность сварного образца низкая. Температура соединения 1000 и 1100° С при давлениях 1,2 и 5 кгс/мм² обеспечивает соединение, равнопрочное основному металлу; при этом фактически исчезают границы раздела двух заготовок, образцы разрушаются по основному металлу. Некоторое снижение пластичности наблюдается при давлении 5 кгс/мм². Величина относительной осадки для давления 5 кгс/мм² при 1000 и 1100° С составляет 4,5 и 16%, а для тех же температур при давлении 2 кгс/мм² — 1,5—2%.

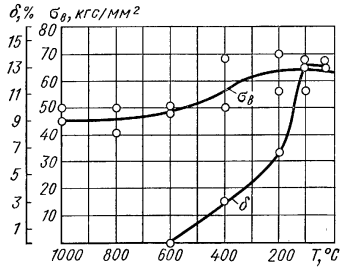


Рис. 60. Зависимость прочности и пластичности соединения из конструкционной стали от температуры охлаждения

Аналогичные зависимости прочности соединения от температуры, давления, разрежения и других факторов получены и для других материалов. В зависимости от условий работы сварных соединений прочность оценивали испытаниями на растяжение, кручение, ударную вязкость, угол изгиба и сдвиг. При этом были получены удовлетворительные результаты.

Продолжительность сварки и охлаждения. Установлена зависимость прочности сварного соединения от времени сварки, с увеличением которого прочность сварного соединения растет до предела прочности основного металла (рис. 60). Дальнейшее увеличение продолжительности сварки на прочность сварного соединения не влияет. Однако чрезмерное увеличение выдержки снижает прочность сварного соединения. Аналогичным образом влияет продолжительность процесса на относительное удлинение и ударную вязкость.

Влияние температуры охлаждения сваренных в вакууме образцов на прочность и пластичность изучали при $T = 1000°$ С, $p = 2$ кгс/мм², $\tau = 5$ мин.

На рис. 61 приведены кривые прочности соединения образцов, охлаждаемых до разных температур в вакуумной камере. При охлаждении на воздухе в интер-

вале температур 1000—600° С пластичность отсутствует. При понижении температуры до 200° С пластичность повышается до 7% и при температуре 100° С и ниже она достигает максимума — 13%. Таким образом, охлаждение в вакуумной камере под давлением сваренных образцов (деталей) обеспечивает необходимую прочность и пластичность соединяемых металлов и сплавов.

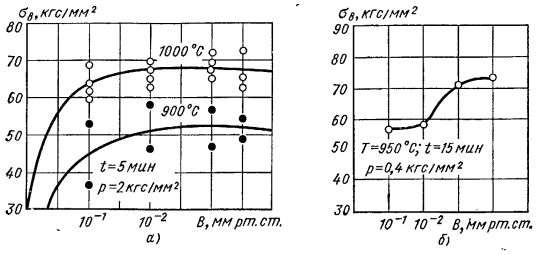


Рис. 61. Зависимость прочности сварного соединения от степени разрежения при сварке:

а — конструкционная сталь 45; *б* — сталь 45 со сталью Р18

В а к у у м и р о в а н и е п р и с в а р к е. Исключительно важное значение для проведения процессов диффузионной сварки имеет степень разрежения. При этом следует учитывать некоторые особенности, в частности усиление газовыделения из деталей и стенок камеры при повышении температуры. Опыты проводили при $T = 900$ и 1000° С, $p = 2$ кгс/мм², $\tau = 5$ мин.

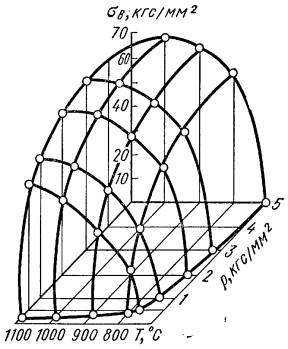


Рис. 62. Диаграмма объемной зависимости прочности соединения из стали 45 от температуры и степени разрежения

Из кривых, построенных для стали 45, следует, что при 1000° С прочность соединения значительно возрастает до степени разрежения 10^{-1} мм рт. ст.; при дальнейшем увеличении разрежения наблюдается увеличение прочности. При температуре 900° С прочность соединения повышается до степени разрежения 10^{-2} мм рт. ст., дальнейшее повышение разрежения не оказывает столь большого влияния на прочность соединения (рис. 62).

На основе расчетов и экспериментальной проверки установлено, что степень разрежения в вакуумной камере в диапазоне использованных режимов (10^{-2}—10^{-5} мм рт. ст.) вполне обеспечивает такую чистоту соединяемых поверхностей, которая гарантирует создание монолитного соединения, равнопрочного основному металлу.

Т е х н о л о г и я д и ф ф у з и о н н о й с в а р к и. С технологической точки зрения при выполнении диффузионной сварки важны следующие основные требования: должны быть обеспечены очистка поверхностей соединяемых материалов и непосредственный их контакт; материалы, подвергаемые соединению, следует нагреть до соответствующей температуры способствующей диффузии;

защитная атмосфера должна предотвращать окисление или загрязнение материалов.

Оптимальное значение вакуума выбирают с учетом свойств свариваемых материалов и результатов исследований. При недостаточном вакууме усиливается окисление свариваемых материалов. Получение высокого вакуума существенно снижает производительность сварки, приводит к удорожанию процесса и может быть оправдано только с точки зрения эффективности очистки свариваемых поверхностей от окислов и различных газов.

Обработка поверхности должна обеспечить максимальную площадь контакта свариваемых поверхностей. При выборе класса шероховатости поверхности следует ориентироваться на технико-экономические возможности предприятия.

Способ очистки свариваемых поверхностей от пленок выбирают в зависимости от природы и вида пленок.

Температура сварки должна обеспечить большую скорость пластического деформирования и развитие диффузионных процессов. Температуру сварки определяют из соотношения $T_{св} = 0{,}7T_{пл}$. Для жаропрочных сплавов и тугоплавких металлов она может быть несколько выше.

Давление должно достигать такой величины, чтобы осуществлялась деформация микронеровностей и шероховатостей на свариваемых поверхностях и обеспечивалась максимальная истинная площадь контакта последних. Ориентировочно оптимальное значение давления, обеспечивающего получение качественного соединения, не приводящего к макроскопической деформации зоны сварки, равно пределу упругопластической деформации свариваемых материалов при температуре сварки. При сварке разнородных материалов давление устанавливают в зависимости от характеристик менее прочного из свариваемых материалов.

В случае недостаточно интенсивной диффузии между компонентами соединяемых материалов при резко различных коэффициентах линейного расширения или при возможном появлении интерметаллидов, оказалось целесообразным применять промежуточную прокладку или подслой в виде фольги, порошка и т. п.

Время сварки выбирают, в зависимости от наличия промежуточной прослойки между свариваемыми поверхностями, опытным путем или расчетом по существующим методикам.

В качестве примера приводится методика разработки технологического процесса диффузионной сварки жаропрочных сплавов ХН75МБТЮ (ЭИ602) и ЭП99.

С в а р к а б е з п р о м е ж у т о ч н ы х п р о с л о е к. Оптимальное значение давления сжатия и температуры сварки определялось экспериментально. Давление изменяли в пределах 1—4 кгс/мм² через каждые 0,5 кгс/мм². Сварку выполняли при температурах 1100, 1150, 1175 и 1200 °С; время сварки было постоянным (6 мин).

Режим сварки признавали оптимальным, если сварные соединения были равнопрочны основному металлу. Механические свойства соединений определяли на пятикратных гагаринских образцах диаметром 6 мм, вырезаемых перпендикулярно стыку.

Среднеарифметические значения временного сопротивления разрыву $\sigma_в$ и относительного удлинения δ, подсчитанные по результатам испытания 3—12 образцов, приведены на рис. 63 и 64. По мере увеличения давления сжатия прочность соединений увеличивается, очевидно, вследствие увеличения поверхности фактического контакта.

При увеличении температуры сварки до 1200° С пластичность и прочность сварных соединений обоих сплавов понижается. Это связано с чрезмерным ростом зерна у сплава ХН75МБТЮ (ЭИ602) и растворением упрочняющих фаз у сплава ЭП99.

Опыты, проведенные при температуре 1250° С и давлении выше 1 кгс/мм², показали, что в соединениях обоих сплавов по границам зерен образуются трещины.

После определения оптимальных значений температур и давления проведено исследование влияния времени сварки на прочность соединений. Минимальное время сварки сплава ЭП99 6 мин, а сплава ХН75МБТЮ (ЭИ602) 3 мин.

Приведенные данные позволяют рекомендовать следующий режим сварки: для сплава ХН75МБТЮ (ЭИ602) $T = 1150 \div 1175°$ С, $p = 2{,}5 \div 3$ кгс/мм², $\tau = 3 \div 4$ мин; для сплава ЭП99 $T = 1150 \div 1175°$ С, $p = 3{,}5 \div 4$ кгс/мм², $\tau = 6 \div 7$ мин.

Сварка с расплавляющейся прослойкой. Исследованиями установлены важные преимущества сварки с расплавляющимися прослойками по сравнению со сваркой без прослоек.

Сплавы с повышенным содержанием элементов с большим сродством к кислороду (алюминий, титан и др.), в частности сплав ЭП99, предпочтительно сваривать с промежуточными расплавляющимися прослойками.

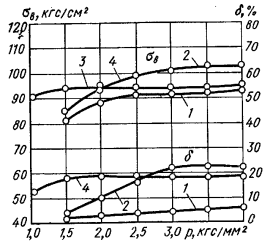


Рис. 63. Влияние давления сжатия и температуры сварки на механические свойства соединений из сплава ЭП99:

1) $T = 1000°$ С; *2*) $T = 1150°$ С; *3*) $T = 1175°$ С; *4*) $T = 1200°$ С

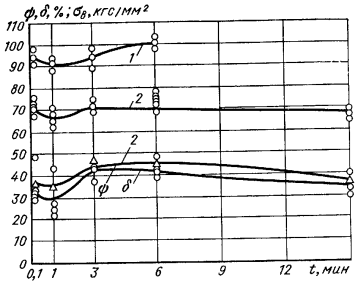


Рис. 64. Влияние времени сварки на механические свойства соединений сплавов ЭП99 (1) и ХН75МБТЮ (2). Режим сварки сплава ЭП99:

$T = 1150°$ С; $p = 4$ кгс/мм²; сплава ХН75МБТЮ (ЭИ602): $T = 1150°$ С, $p = 3$ кгс/мм²

Сварку без расплавляющихся прослоек рекомендуется выполнять с нанесением на стыкуемые поверхности фтористого аммония, причем при сварке сплава ЭП99 — независимо от перерыва между очисткой поверхностей и сваркой.

При жестких требованиях к точности деталей сварку во всех случаях следует выполнять с применением расплавляющихся прослоек.

На сварку детали поступают после механической обработки, обеспечивающей обработку соединяемых поверхностей по 6-му классу шероховатости. Непосредственно перед сваркой соединяемые поверхности зачищают мелкозернистой наждачной бумагой и промывают ацетоном. При применении расплавляющихся прослоек зачистку допускается выполнять за сутки до сварки.

В качестве расплавляющихся прослоек для указанных сплавов рекомендуется применять фольгу из припоя ВПр7 толщиной 0,1—0,06 мм. Перед введением встык фольгу зачищают мелкозернистой наждачной бумагой и промывают ацетоном. Если конструкция детали не допускает вытеснения избыточного количества расплавленного металла прослойки на боковые кромки (детали с внутренними каналами), то толщину и площадь фольги уменьшают. Однако площадь фольги не должна быть меньше $^2/_3$ площади контакта деталей. Фольгу рекомендуется приваривать к поверхности одной из деталей с помощью точечной конденсаторной сварки.

По сравнению с пайкой диффузионная сварка резко повысила прочность и точность деталей. Сварные соединения не разрушались при изгибе на 180°, тогда как паяные разрушались без заметного изменения профиля. При испытании на разрыв разрушение сварных соединений частично происходит по основному металлу.

Сварка с расплавляющимися прослойками наиболее рациональна для соединения жаропрочных сплавов в вакууме.

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА

Энергия электронов. Электроны применяют в технике для возбуждения свечения люминофоров, нанесенных на экран электронно-лучевых трубок катодных осциллографов и телевизоров. Эффекты, вызываемые электронами при бомбардировке вещества, используются в электронных микроскопах, электронных умножителях, рентгеновских трубках, масспектрографах и во многих других устройствах и приборах.

Электрон представляет собой элементарную электрически заряженную частицу, имеющую отрицательный заряд $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ К; массу $m_e = 9{,}109 \times 10^{-31}$ кг; радиус $r_e = 2{,}82 \cdot 10^{-15}$ м; удельный заряд $e/m_e = 1{,}759 \cdot 10^{11}$ к/кг. Число электронов в атоме зависит от типа вещества и равно его атомному номеру в периодической системе элементов Д. И. Манделеева.

Широкое применение электронов связано с тем, что электрон, являясь наименьшей устойчивой заряженной элементарной частицей материи, может быть наиболее простым способом получен в свободном состоянии. В большинстве случаев, подведя соответствующую энергию, можно вызвать выход электронов с поверхности металла. Наиболее часто для получения свободных электронов используют термоэлектронные катоды, в которых, как правило, металлы нагреваются до таких температур, при которых электроны приобретают достаточную скорость, чтобы покинуть металл и перейти в окружающее катод пространство, в результате чего возникает эмиссия электронов. Величина тока термоэлектронной эмиссии зависит от температуры катода, работы выхода и свойств поверхности (уравнение Ричардсона—Дэшмана):

$$j_e = AT^2 e^{-\frac{e\varphi_0}{kT}}, \qquad (9)$$

где j_e — плотность тока эмиссии, А/см²; A — эмиссионная постоянная, зависящая от свойств излучающей поверхности и равная для большинства чистых металлов 40—70 А/(см² · °С²); T — абсолютная температура катода, К; e — основание натуральных логарифмов; $e\varphi_0$ — работа выхода электрона из металла, Дж; $k = 1{,}38 \times 10^{-23}$ Дж/°С — постоянная Больцмана.

Уравнение (9) показывает, что величина тока эмиссии в наибольшей степени зависит от температуры катода. Однако при увеличении температуры резко возрастает скорость испарения материала катода и сокращается срок его службы.

Свободные электроны под действием электрических или магнитных полей могут перемещаться. Поскольку электроны обладают самой малой инертной массой из всех масс элементарных частиц, обладающих зарядом, то электрону можно сообщить большие ускорения.

Если электрон поместить в однородное электрическое поле напряженностью E (рис. 65), созданное между двумя параллельными пластинами достаточно большой протяженности, то на электрон будет действовать сила, равная произведению величины заряда на напряженность поля в месте нахождения заряда:

$$F = -eE. \qquad (10)$$

Знак минус показывает, что вследствие отрицательного заряда электрона сила имеет направление, противоположное направлению вектора напряженности электрического поля. Работа, затраченная электрическим полем на перемещение заряда

из одной точки в другую, равна произведению величины заряда на разность потенциалов между этими двумя точками:

$$A = eU = e(U_4 - U_1), \quad (11)$$

где U — разность потенциалов между точками *1* и *2* (рис. 65). Эта работа затрачивается на сообщение электрону кинетической энергии

$$W_к = \frac{m_e(v^2 - v_0^2)}{2}, \quad (12)$$

где v и v_0 — скорости движения электрона в точках *1* и *2*.

Сумма кинетической и потенциальной энергий электронов при их движении в электрических полях остается постоянной, то из формул (12) и (10) получаем

$$\frac{m_e(v^2 - v_0^2)}{2} = eU. \quad (13)$$

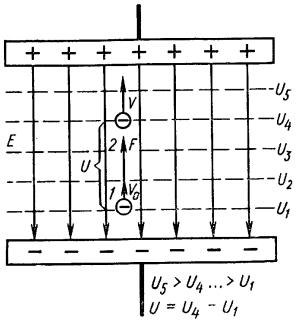


Рис. 65. Движение электрона в ускоряющем электрическом поле

Если начальная скорость электрона $v_0 = 0$, то

$$\frac{m_e v^2}{2} = eU. \quad (14)$$

Из выражения (14) следует, что энергия электронов определяется массой и скоростью частицы. Энергия электронов может достигать больших значений и зависит от разности потенциалов разгоняющего поля. Скорость электрона, выраженная через потенциал разгоняющего поля U, равна

$$v = \sqrt{\frac{2e}{m_e} U}. \quad (15)$$

Подставляя в формулу (15) значение заряда и массы электрона, можно получить приближенное выражение для расчета скорости электрона

$$v \approx 600\sqrt{U} \text{ км/с}, \quad (16)$$

где U — разность потенциалов, В.

Таким образом, скорость, приобретаемая электроном при движении в ускоряющем поле, зависит только от пройденной разности потенциала. Из формулы (16) видно, что скорости электронов даже при сравнительно небольшой разности потенциалов получаются значительными. Например, при $U = 10\,000$ В скорость электронов составляет $v = 60\,000$ км/с. При такой большой скорости электронов все процессы, связанные с движением электронов, протекают очень быстро.

Выбором величины и направления начальной скорости электронов, а также величины и направления напряженности электрического поля может заставить электроны двигаться по заранее рассчитанной траектории. Это дает возможность управлять движением электронов, получать требуемые энергию электронов и плотность в пучке и т. п. Влияние магнитного поля на движущийся электрон аналогично действию поля на проводник с током.

Сила, действующая на электрон, движущийся в магнитном поле, определяется из выражения

$$F = B_e v \sin\alpha, \quad (17)$$

где B_e — магнитная индукция; α — угол между направлением тока и магнитной силовой линией поля.

Из выражения (17) следует, что электрон, движущийся вдоль силовых линий магнитного поля ($\alpha = 0$), не испытывает никакого воздействия поля ($F = B_e v \sin 0 = 0$) и продолжает перемещаться с заданной ему начальной скоростью.

Если вектор начальной скорости электрона перпендикулярен вектору магнитной индукции, т. е. $\alpha = \pi/2$ (рис. 66, *а*), то сила, действующая на электрон,

$$F = B_e v \sin\frac{\pi}{2} = B_e v. \quad (18)$$

Направление этой силы определяется по правилу левой руки. Сила F всегда перпендикулярна направлению мгновенной скорости электрона v и направлению магнитных силовых линий поля. В соответствии со вторым законом Ньютона эта сила сообщает электрону с массой m_e ускорение, равное $B_e v/m_e$. Поскольку ускорение перпендикулярно скорости v, то электрон под действием этого нормального (центростремительного) ускорения будет двигаться по окружности, перпендикулярной силовым линиям поля. Начальная скорость электрона может быть и

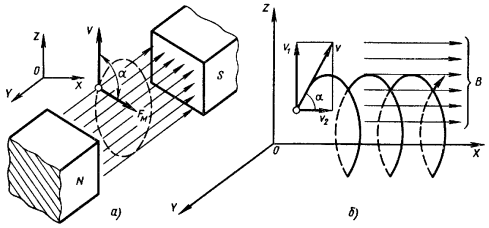


Рис. 66. Траектория электрона в магнитном поле

не перпендикулярна магнитной индукции, т. е. $\alpha < \pi/2$ (рис. 66, *б*). Тогда траекторию движения электрона определяют две составляющие начальной скорости: нормальная v и касательная v_2. Первая направлена перпендикулярно силовым линиям магнитного поля, а вторая параллельно им. Под действием нормальной составляющей электрон движется по окружности, а под действием касательной — перемещается вдоль силовых линий поля. В результате действия двух составляющих траектория движения электрона принимает вид спирали. Возможность изменения траектории движения электрона с помощью магнитного поля используется для фокусировки и управления магнитным потоком.

Электроны, двигаясь в электрическом поле, могут накопить значительную кинетическую энергию. При достижении электроном поверхности металлического анода скорость электронов резко уменьшается вследствие столкновения их с атомами металла. При таких столкновениях кинетическая энергия электронов передается атомам вещества, подвергающегося бомбардировке. Эффект передачи энергии электронов веществу проявляется увеличением температуры вещества.

Если на анод попадает N электронов в секунду, то выделяющаяся на аноде мощность в виде тепла равна

$$P_a = NeU. \quad (19)$$

Произведение Ne в уравнении (19) представляет собой количество электричества в кулонах, попадающее в 1 с на анод, т. е. величину тока в амперах. Поэтому мощность, выделяющаяся на аноде,

$$P_a = I_a U, \quad (20)$$

Нагрев анода электронной бомбардировкой является во многих случаях нежелательным явлением и лишь в последнее время этот эффект начал использоваться как положительный фактор при различных технологических процессах, связанных с термическим воздействием (сварке, плавке, обработке, напылении пленок и т. п.), что значительно расширило область применения электронного луча.

Установлено, что электроны, обладающие определенной энергией, могут проникать в вещество. Толщина слоя вещества, пройдя который, электрон полностью теряет скорость, определяет его пробег. Пробеги электронов в металлах, при сравнительно небольших энергиях электронов (10—82 кВ), были изучены Б. Шенландом. Согласно Шенланду пробег электронов выражается зависимостью

$$\delta = 2{,}1 \cdot 10^{-12} \frac{U^2}{\rho}, \qquad (21)$$

где δ — пробег электронов, см; U — разгоняющее напряжение, В; ρ — плотность вещества, г/см³.

Расчеты, произведенные по формуле (21), показывают, что электроны в зависимости от разгоняющего напряжения и свойств металла могут проникать на глубину нескольких десятков и даже сотен микрон. Глубина проникновения электронов в металл невелика, но учет ее позволяет объяснить некоторые эффекты, связанные с особенностями электронного нагрева при сварке.

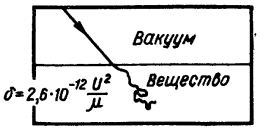


Рис. 67. Путь электрона в веществе

Изучение адсорбции монохроматического потока электронов показывает, что проникающий в вещество электрон испытывает многократное рассеяние и теряет энергию в результате многочисленных соударений с ядрами атомов и электронами решетки.

В результате этих столкновений меняется скорость и направление движения электронов, проникающих в вещество (рис. 67).

Электроны растрачивают основную долю энергии в конце пробега. Таким образом, в отличие от других методов сварки нагревом посредством теплопередачи через поверхность металла, электронный нагрев осуществляется в самом веществе. При этом электроны теряют свою энергию неравномерно в направлении пробега. Вследствие этого наиболее интенсивное тепловыделение наблюдается на некоторой глубине.

Особенности электронного нагрева, связанного с выделением тепла в слое вещества, можно определить, рассматривая дифференциальное уравнение теплопроводности с источником тепла в самом металле:

$$\frac{\partial t(x;\ \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x;\ \tau)}{\partial x^2} + \frac{1}{c\rho} W(x;\ \tau), \qquad (22)$$

где t — температура среды; x — расстояние от поверхности; τ — время; a — коэффициент температуропроводности; c — теплоемкость металла; ρ — плотность металла; $W(x;\ \tau)$ — интенсивность источника — количество тепла, выделяющегося в единицу времени в единице объема в данной точке металла.

Количество выделенной электроном энергии можно аппроксимировать зависимостью

$$W(x) = -\frac{d(n;\ E)}{dx} = C_0 e^{kx}, \qquad (23)$$

где n — число электронов, проходящих через единицу поперечного сечения поверхности анода в 1 с; E — средняя энергия электрона в данной точке; C_0 — постоянная; k — коэффициент, характеризующий поглощение энергии в металле.

Дифференциальное уравнение нагрева поверхностного слоя металла электронным лучом

$$\frac{\partial t(x;\ \tau)}{\partial x} = a \frac{\partial^2 t(x;\ \tau)}{\partial x^2} + \frac{C_0}{c\rho} e^{kx}. \qquad (24)$$

Математическое исследование решения уравнения (24) показывает, что с увеличением продолжительности импульса слой с максимальной температурой сдвигается к поверхности металла в результате теплопроводности (рис. 68), и при определенной продолжительности импульса на поверхности металла будет максимальная температура.

Физическая картина внешних явлений, сопровождающих действие электронов на металл, состоит из рентгеновского излучения, теплоизлучения, возникновения отраженных вторичных электронов, испарения металла в виде атомов и ионов металла и может быть изображена следующим образом (рис. 69).

Вторичные электроны делятся на три группы: упругоотраженные электроны,

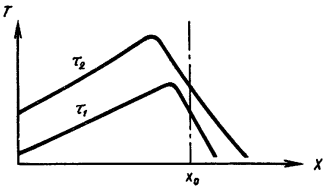


Рис. 68. Изменение температуры в слое вещества с увеличением времени импульса $\tau_2 > \tau_1$; $x_2 < x_1$

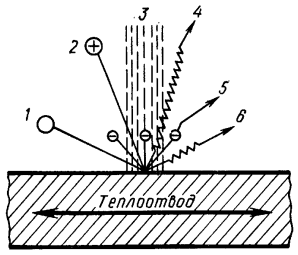


Рис. 69. Физическая картина явлений, сопровождающих проникновение электронов в веществе:

1 — молекулы металла; *2* — ионы; *3* — луч; *4* — рентгеновское излучение; *5* — отраженные и вторичные электроны; *6* — тепловое и световое излучение

энергия которых примерно равна падающим; электроны, отраженные в результате неупругого соударения и имеющие более или менее большие потери; собственно вторичные электроны, энергия которых не превышает 50 эВ.

Энергия отраженных электронов в среднем составляет 70% от энергии первичных. Если отношение числа рассеянных электронов к числу падающих обозначить β, то потери энергии пучка на рассеянных электронах составит $E_p = 0{,}7\beta$.

Величина β колеблется в пределах 0,1—0,45 в зависимости от порядкового номера элемента.

Сварка электронным лучом в вакууме. Сущность процесса сварки электронным лучом в вакууме состоит в использовании кинетической энергии электронов, быстро движущихся в глубоком вакууме. При бомбардировке электронами поверхности металла подавляющая часть кинетической энергии электронов превращается в тепло, которое и используется для расплавления металла.

При использовании этого источника тепла для сварки необходимо получить свободные электроны, сконцентрировать и сообщить им большую скорость с целью увеличения их энергии, которая должна превратиться в тепло при торможении электронов в свариваемом металле.

Получение свободных электронов достигается применением раскаленного металлического катода, эмиттирующего электроны. Ускорение электронов обеспечивается электрическим полем с высоким потенциалом между катодом и анодом.

Фокусировка — концентрация электронов — достигается использованием магнитных полей. Резкое торможение электронного потока происходит автоматически при внедрении электронов в металл.

Электронный луч, используемый для целей сварки, получается в специальном приборе — электронной пушке.

Принципиальная схема установки для сварки электронным лучом показана на рис. 70. Электронная пушка представляет собой устройство, с помощью которого получают узкие электронные пучки с большой плотностью энергии. Пушка имеет катод *1*, который может нагреваться до высоких температур. Катод размещается внутри прикатодного электрода *2*. На некотором удалении от катода находится ускоряющий электрод (анод) *3* с отверстием. Прикатодный и ускоряющий электроды имеют форму, обеспечивающую такое строение электрического поля между ними, которое фокусирует электроны в пучок с диаметром, равным диаметру отверстия в аноде. Положительный потенциал ускоряющего электрода может достигать нескольких десятков тысяч вольт, поэтому электроны, эмиттированные катодом на пути к аноду, приобретают значительную скорость и энергию. После ускоряющего электрода электроны движутся равномерно. Пушка получает питание электрической энергией от высоковольтного источника постоянного тока. Электроны, имея одинаковый заряд, отталкиваются друг от друга, вследствие чего диаметр пучка увеличивается, а плотность энергии в пучке уменьшается.

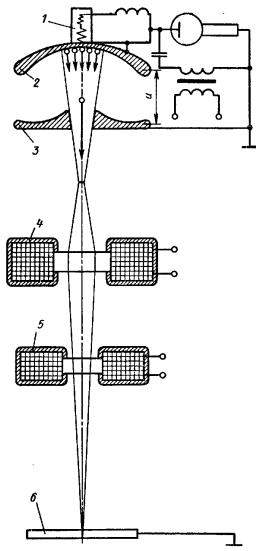


Рис. 70. Схема установки для сварки электронным лучом

Для увеличения плотности энергии в луче, после выхода электронов из первого анода, они фокусируются магнитным полем в магнитной линзе *4* в плотный пучок и ударяются с большой скоростью о малую, резко ограниченную площадку на изделии *6*, при этом кинетическая энергия электронов, вследствие торможения в веществе, превращается в тепло, нагревая металл до высоких температур.

Для перемещения луча по свариваемому изделию на пути электронов устанавливается магнитная отклоняющая система *5*, позволяющая устанавливать электронный луч точно по линии сварки.

Для обеспечения свободного движения электронов от катода к аноду и далее к изделию, для тепловой и химической изоляции катода, а также для предотвращения возможности возникновения дугового разряда между электродами, в установке создается глубокий вакуум порядка $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст., который обеспечивается насосной системой установки. Движение электронов в вакууме не сопровождается световыми эффектами и поэтому луч не виден, но его действие на вещество можно наблюдать по нагреву места бомбардировки, свечению люминофоров и т. п. Плотность энергии в источнике нагрева является одной из основных характеристик источника и определяет его эффективный коэффициент использования тепла, форму провара, размеры зоны термического влияния и другие параметры.

Электронный поток является наиболее эффективным источником тепла при сварке, поскольку плотность энергии в луче превышает плотность энергии электрической сварочной дуги более чем на два порядка. На рис. 71 показан график, характеризующий различные источники тепла. По оси абсцисс приведены диаметры эффективных пятен нагрева, которые характеризуют возможность использования источника тепла для сварки микроизделий. По оси ординат отложена максимальная плотность энергии, которая может быть достигнута в источнике тепла. Наклонными линиями показана мощность источника, которая изменяется от нескольких до сотен киловатт.

Из графика следует, что электронный луч как источник тепла обладает свойствами, которые дают возможность использовать его для самых слабых нагревов и как источник, сосредоточенность которого на два порядка выше, чем у сварочной дуги. Электронный луч также может быть сосредоточен на очень малой площади, что дает возможность использовать его для сварки изделий микроэлектроники.

11. Плотность энергии различных источников тепла и минимальная площадь пятна нагрева

Источник тепла	Минимальная площадь пятна нагрева, см²	Максимальная плотность энергии, Вт/см²
Ацетилено-кислородное пламя	10^{-2}	$5 \cdot 10^4$
Сварочная дуга	10^{-3}	$1 \cdot 10^5$
Электронный луч	10^{-7}	$5 \cdot 10^8$
Луч оптического квантового генератора		

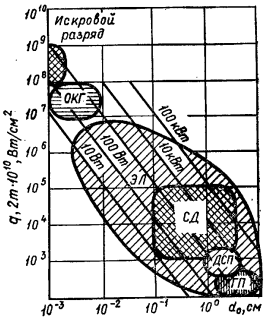


Рис. 71. Плотность энергии q и диаметр d_0 пятна нагрева для различных источников теплоты:

ГП — газовое пламя; *ДСП* — дуговая плазма; *СД* — сварочная дуга; *ЭЛ* — электронный луч; *ОКГ* — оптический квантовый генератор

Мощность электронного луча может достигать очень больших величин, что делает его перспективным для использования при сварке больших толщин (200—500 мм).

В табл. 11 приведены сравнительные данные полученных минимальных площадей пятен нагрева и наибольшей плотности энергии электронного луча.

Плотность энергии в электронном луче интенсивностью $5 \cdot 10^8$ Вт/см² достигает 500 000 кВт/см², т. е. на 1 см² с помощью электронного луча может быть сосредоточена энергия мощной современной турбины.

При нагреве электронным лучом за очень короткий промежуток времени в пятне могут быть получены весьма высокие температуры.

Результаты расчета показывают, что в слое металла, подвергающегося электронной бомбардировке, при толщине слоя, равной пробегу электрона, должна была бы устанавливаться температура порядка 10^7—10^8 °С в течение 1 с. В реальных условиях такие температуры в металле, подвергаемом электронной бомбардировке, существовать не могут вследствие испарения металла на поверхности, на что расходуется значительная часть энергии, и интенсивного перемешивания расплавленного металла газами и парами, выделяющимися при нагревании. Эти процессы приводят к выравниванию температуры.

Применительно к сварочным целям интенсивность энергии в электронном потоке должна иметь свой оптимум, так как при очень высокой сосредоточенности источника тепла процесс сопровождается не только плавлением, но и интенсивным испарением металла, вследствие чего осуществляется процесс резания металла.

По этому принципу построены электронные пушки, предназначенные для сверления и фрезерования, при этом металл удаляется с обрабатываемой поверхности за счет мгновенного испарения.

Высокая интенсивность сварочных источников тепла обеспечивает возможность осуществления сварки электронным лучом любых металлов. Выбор интенсивности энергии в электронных пучках, используемых для целей сварки, определяется рядом факторов: свойствами металла (температура плавления, теплопроводность и др.), его толщиной, формой сварного соединения и т. д. При сварке более тугоплавких и теплопроводных металлов и сварке больших толщин целесообразно применять электронный луч с более высокой плотностью энергии. При

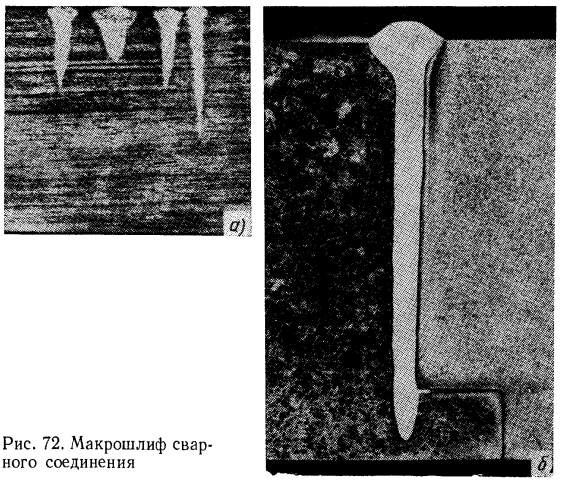


Рис. 72. Макрошлиф сварного соединения

сварке легкоплавких и легкоиспаряющихся металлов и сварке малых толщин целесообразно использование лучей с относительно малой плотностью энергии, а в ряде случаев с импульсным процессом нагрева.

На рис. 72, *а* показаны макрошлифы, на которых видно изменение формы и размеров зоны проплавления при сварке электронным лучом различной мощности при разгоняющем напряжении 70 кВ.

При использовании электронного луча, обладающего большой плотностью энергии, обнаруживается ярко выраженное направленное тепловое воздействие. Зона расплавления в металле вытягивается преимущественно в направлении действия электронного луча. При дальнейшем повышении мощности зона проплавления принимает форму конуса с отношением глубины шва h к ширине проплавления b, достигающим 10—15. На рис. 72, *б* показан макрошлиф поперечного сечения соединения из стали различных марок, выполненного электронно-лучевой сваркой.

Важным преимуществом сварки электронным лучом является возможность получения узкой и глубокой зоны проплавления. Однако процесс образования глубокого кратера и условия его устойчивого существования в процессе сварки

еще полностью не выяснены. В технической литературе высказываются различные предположения о механизме образования кратера, часто диаметрально противоположные. Связано это с большими трудностями, возникающими при постановке экспериментов по выяснению механизма возникновения и устойчивого существования кратера, и, кроме этого, нет ясности в роли силовых факторов, действующих на расплавленный металл при глубинном проплавлении.

Наблюдения за процессом сварки и теоретические расчеты позволяют получить некоторые представления о процессе сварки электронным лучом с глубоким проплавлением. В начальной стадии при неподвижном луче наблюдается образование углубления в металле в виде конуса (рис. 73). Конус проплавления образуется следующим образом: по мере достижения заданной мощности и фокусирования вся энергия луча сосредоточивается в поверхностном слое свариваемого металла, толщина которого равна глубине проникновения электронов в металл. При этом площадь пятна нагрева равна площади сечения луча, и плотность энергии на по-

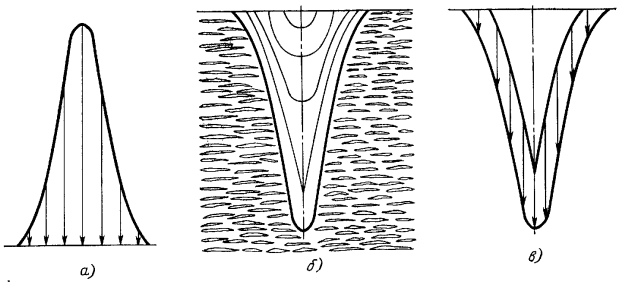


Рис. 73. Образование зоны проплавления при неподвижном луче:

а — распределение энергии в луче; *б* — форма проплавления; *в* — распределение энергии луча в зоне расплавления

верхности металла максимальна. Эксперименты показывают, что в начальной стадии нагрева неподвижным лучом наблюдается интенсивный вынос жидкого металла из зоны нагрева. В металле образуется углубление в виде конуса, боковая поверхность которого значительно больше площади основания конуса, вследствие чего плотность энергии луча на его боковой поверхности уменьшается. Установившаяся плотность энергии на боковой поверхности конуса проплавления имеет такую величину, при которой размеры кратера не изменяются. Исследования кратеров проплавления при неподвижном луче показывают, что стенки кратера имеют весьма тонкий слой жидкого металла, толщина которого для стали не превышает 0,15 мм.

Процессы, происходящие в кратере, представляются весьма сложными. Интенсивная электронная бомбардировка металла на передней стенке кратера, сопровождающаяся значительным перегревом металла, высокие скорости кристаллизации металла на задней стенке кратера, обусловливающие высокие градиенты температур, наличие паров и газов в канале кратера и взаимодействие их с электронами пучка, приводящее к пульсирующему подводу энергии в кратер, сложные перемещения жидкого металла в кратере, вызывающие недостаточно качественное формирование металла шва на некоторых режимах, и ряд других явлений затрудняют изучение этого процесса.

Выяснение характера переноса металла в кратере и сил, участвующих в этом переносе, имеет большое значение для понимания процессов, происходящих при

электронно-лучевой сварке. Экспериментально установлено, что при движущемся луче плавление металла происходит на передней стенке кратера, после чего расплавленный металл перемещается к задней стенке, не подвергающейся нагреву электронным лучом, где он и кристаллизуется.

До последнего времени не было единства мнений в вопросе о путях перемещения жидкого металла в кратере: в литературе можно встретить мнения, что перенос металла в кратере происходит в основном через дно сварочной ванны. Результаты экспериментов показывают (рис. 74), что перенос металла в зону кристаллизации происходит по стенкам кратера, так как при эксперименте происходило сквозное проплавление пластины и ванна дна не имела.

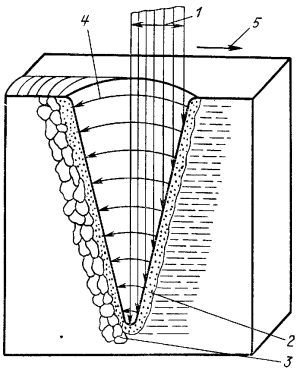


Рис. 74. Схема переноса жидкого металла при электронно-лучевой сварке:

1 — электронный луч; *2* — передняя стенка кратера; *3* — зона кристаллизации; *4* — путь движения жидкого металла; *5* — направление сварки

Установление факта переноса жидкого металла по стенкам кратера является весьма важным для практики электронно-лучевой сварки, так как дает возможность использовать его для улучшения качества сварного соединения и повышения производительности. Важным также является выявление сил, под действием которых происходит перемещение жидкого металла в кратере.

Теоретический анализ показывает, что действием известных сил (давление потока электронов, электромагнитные силы, реакция паров металла, статическое давление паров) нельзя объяснить перемещение металла в кратере.

Силы, перемещающие жидкий металл в кратере, возникают в результате неравномерного распределения температур в кратере. На передней стенке кратера, которая подвергается воздействию электронного потока, температура в поверхностном слое может достигать температуры кипения металла; на задней стенке кратера температура близка к температуре кристаллизации. Вследствие температурного градиента создаются условия, при которых металл может транспортироваться из зоны нагрева в зону кристаллизации под действием сил поверхностного натяжения.

Известно, что сила поверхностного натяжения зависит от температуры. Чем больше температура, тем меньше сила поверхностного натяжения. Поэтому при наличии градиента температур на поверхности жидкого металла появляется сила (направленная тангенциально к поверхности), величина которой определяется градиентом поверхностного натяжения $P_t = \operatorname{grad} \sigma$. Она стремится привести поверхность жидкости в движение в направлении от места с меньшим к местам с большим поверхностным натяжением; жидкий металл должен перемещаться от больших к меньшим температурам, т. е. в нашем случае от передней к задней стенке кратера. Расчеты показывают, что в процессе сварки за счет термокапиллярного эффекта переносится около 20% металла. Основной перенос жидкого металла осуществляется из-за разности давлений, вызванных различным поверхностным натяжением в зоне плавления и кристаллизации. Давление под поверхностью жидкого металла определяется уравнением

$$p = p_0 - \frac{\sigma}{r}, \qquad (25)$$

где p_0 — давление над поверхностью жидкости; r — радиус кривизны пленки в сечении, перпендикулярном оси кратера.

Можно принять давление пара в кратере одинаковым по всему сечению, перпендикулярному оси кратера, $p_0 = \text{const}$ и $r_{пл} = r_{кр} = r$. Учитывая, что $T_{пл} > T_{кр}$ и $\sigma_{пл} < \sigma_{кр}$, из уравнения (25) следует, что $p_{пл} > p_{кр}$, т. е. давление под поверхностью жидкого металла на фронте плавления больше, чем на фронте кристаллизации. Значит, за счет наличия градиента температур и поверхностного натяжения свободной поверхности пленки в поперечном сечении кратера металл будет перемещаться из зоны плавления в зону кристаллизации под действием разности давлений под поверхностью расплава

$$\Delta p = p_{пл} - p_{кр} = \frac{\sigma_{кр} - \sigma_{пл}}{r} = \frac{\Delta\sigma}{r}. \qquad (26)$$

Расход металла определится выражением

$$Q = 2\frac{2}{3\mu}\left|\frac{\partial\sigma}{\partial T}\right|\left|\frac{\partial T}{\partial x}\right|\frac{h^2}{b-2h}Hh, \qquad (27)$$

где μ — коэффициент динамической вязкости жидкости; h — толщина пленки; H — глубина проплавления.

Из анализа продольных и поперечных макрошлифов швов следует, что градиент температур в кратере в плоскости движения луча и ширина шва различны на разных уровнях проплавления (по толщине пластины), поэтому, строго говоря, толщина пленки и расход расплавленного металла изменяются с изменением глубины проплавления.

Характерной особенностью сварки электронным лучом является возможность получения сварных соединений при минимальных затратах энергии на расплавление металла.

Из табл. 12 следует, что при электронно-лучевой сварке требуется в 10—15 раз меньше энергии, чем при дуговой.

На рис. 75 приведен макрошлиф, иллюстрирующий соотношение площадей зон проплавления, полученных при дуговой и электронно-лучевой сварке. Из макрошлифа следует, что площадь зоны проплавления при электронно-лучевой сварке примерно в 25 раз меньше, чем при дуговой.

Известно, что в процессе сварки методами плавления основной металл, прилегающий непосредственно к зоне шва, подвергается своеобразной термической

12. Данные о затратах энергии при различных видах сварки

Вид сварки	Затраты энергии, кДж/см	
	Сталь, $\delta = 12{,}5$ мм	Сплав алюминия, $\delta = 12{,}5$ мм
Дуговая сварка плавящимся электродом в аргоне	76	–
Дуговая сварка вольфрамовым электродом в аргоне	–	46
Электронно-лучевая сварка	7,3	3.2

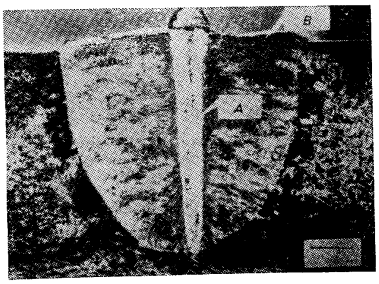


Рис. 75. Зона проплавления при аргонодуговой *B* и электронно-лучевой сварке *A*

обработке, в результате чего в зоне термического влияния наблюдается рекристаллизация и рост зерна. Это вызывает ухудшение физико-механических свойств металла сварного соединения. Особенно опасно длительное воздействие высоких температур на основной металл при сварке аустенитной стали, сплавов циркония, молибдена и других металлов, склонных при нагреве к значительному росту зерна и к снижению коррозионной стойкости.

Высокая концентрация энергии в луче обеспечивает получение швов не только с минимальной зоной расплавленного металла, но и соединений, металл которых в околошовной зоне не претерпевает значительных изменений вследствие ввода минимального количества тепла и значительных скоростей охлаждения.

Отсутствие значительной по протяженности зоны термического влияния исключает недостатки, возникающие при эксплуатации конструкций, вызванные изменением физико-механических свойств металла в околошовной зоне.

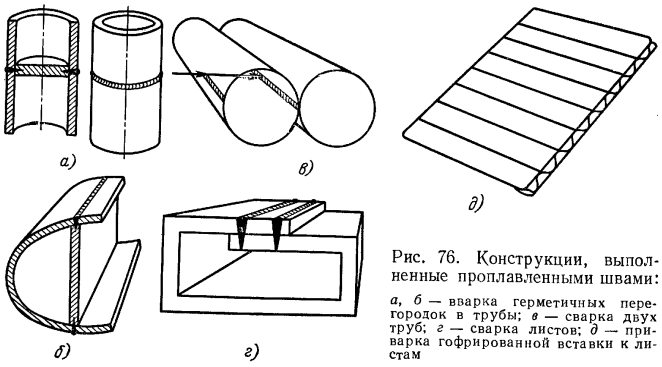


Рис. 76. Конструкции, выполненные проплавленными швами:

а, б — вварка герметичных перегородок в трубы; *в* — сварка двух труб; *г* — сварка листов; *д* — приварка гофрированной вставки к листам

Глубокое проплавление металла при малой погонной энергии, имеющее место при сварке электронным лучом, обусловливает значительно большую скорость отвода тепла от зоны сварки, что обеспечивает увеличение скорости кристаллизации малой по объему сварочной ванны с получением мелкокристаллического строения металла шва, по своим свойствам мало отличающегося от основного металла.

Ввод значительно меньшего количества тепла, имеющего место при электронно-лучевой сварке, дает возможность во много раз уменьшить деформации изделий по сравнению с дуговым способом сварки.

Образование остаточных деформаций в сварных конструкциях связано с тепловыми процессами — распределением температуры по изделию в процессе сварки и охлаждением сварного соединения. Известно, что в большинстве реальных конструкций увеличение погонной энергии приводит к уменьшению остаточных деформаций. Поэтому согласно результатам работ Г. А. Николаева одним из эффективных способов борьбы с деформациями сварных конструкций является применение таких методов сварки, при которых используют более сосредоточенные источники тепла, обеспечивающие минимальную зону с расплавленным металлом.

Малое поперечное сечение луча, перенос энергии на значительные расстояния, получение узких швов с малой площадью расплавленного металла обеспечивают возможность выполнения новых, более совершенных видов сварных соединений и повышают качество изделий.

Сварка электронным лучом расширяет область использования сварных соединений с прорезными швами и электрозаклепами. Этот вид швов впервые был применен при электродуговой сварке под флюсом. Преимуществом прорезных швов и электрозаклепок является возможность сварки конструкций, когда один из элементов конструкции недоступен для непосредственного воздействия дуги. В этом случае, используя глубокий провар, имеющий место при сварке под флюсом, можно получить сварные соединения путем проплавления одного из элементов конструкции. На рис. 76 показаны соединения, образуемые проплавными швами.

Получение глубокого проплавления при электронно-лучевой сварке дает возможность выполнять принципиально новые, более совершенные виды соединений, сварка которых обычными методами невозможна.

На рис. 77 показаны конструкции, сваренные путем одновременного проплавления четырех (рис. 77, *а*) и трех (рис. 77, *б*) листов. Возможность осуществления таких соединений электронным лучом позволяет создавать конструкции, обладающие меньшим весом, большей прочностью, при этом значительно упрощается процесс изготовления изделий.

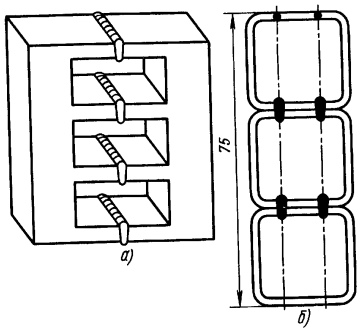


Рис. 77. Конструкции, выполненные одновременной сваркой трех и четырех стыков

Большая концентрация энергии в малом поперечном сечении луча и возможность переноса энергии лучом на значительное расстояние от катода (500 мм и больше) дают возможность использовать электронный луч при сварке в узких щелях, когда методы дуговой сварки не могут быть использованы.

Известно, что при сварке дугой относительно небольшое изменение длины дуги вызывает значительное изменение ее мощности и площади поперечного сечения столба дуги. Это свойство дугового разряда требует, чтобы расстояние между электродом и изделием при сварке выдерживалось строго постоянным.

При сварке электронным лучом пятно нагрева можно переносить в вертикальной плоскости на значительные расстояния. Этот эффект можно использовать в случае необходимости производить сварку изделий, имеющих швы, расположенные в разных плоскостях, что может привести к значительному упрощению конструкции сварочных установок.

Многими исследованиями установлено, что при электронно-лучевой сварке глубина проплавления растет с увеличением ускоряющего напряжения. По данным некоторых зарубежных фирм, при $U_{уск} = 150 \div 200$ кВ электронными лучами проплавляют стальные листы $\delta \approx 100$ мм. Однако сварка при высоком $U_{уск}$ имеет недостатки: возникает необходимость ужесточения требований к точности сборки деталей; зазоры в стыке, по данным зарубежных фирм, должны быть $\leq 0{,}125$ мм; зона проплавления имеет малые поперечные размеры, поэтому надо соблюдать точность совмещения луча со стыком; повышаются требования к металлу с точки зрения содержания в нем газов; качество соединений обычной стали низкое из-за появления пор; увеличивается вероятность высоковольтных пробоев в электронной пушке; усложняется и удорожается оборудование (пушки, источник питания, кабель, изоляция); требуется дополнительная защита от жесткого рентгеновского излучения.

В Московском энергетическом институте разработана техника и технология электронно-лучевой сварки металла больших толщин с использованием низкого

ускоряющего напряжения (до 60 кВ). Сваривались изделия из низколегированной стали марок 16ГНМА, 22К, ЭИ415, 34ХМ1А и др., широко используемой в энергомашиностроении. Детально изучены сварные соединения стали 16ГНМА толщиной 115 мм, из которой изготовляются барабаны котлов высокого давления.

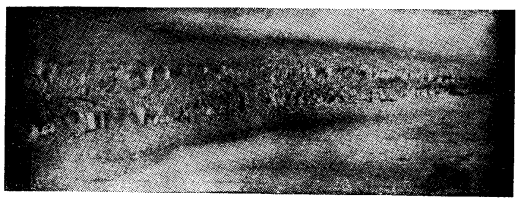


Рис. 78. Макрошлиф соединения, выполненного электронно-лучевой сваркой на стали 16ГНМА толщиной 115 мм

Металлографические исследования показали, что в швах на стали 16ГНМА $\delta = 115$ мм отсутствуют поры, микро- и макротрещины (рис. 78). Ширина шва в верхней части составляет 16—18 мм, а в корне 5—6 мм. По химическому составу шов почти не отличается от основного металла, наблюдается лишь незначительное уменьшение количества марганца.

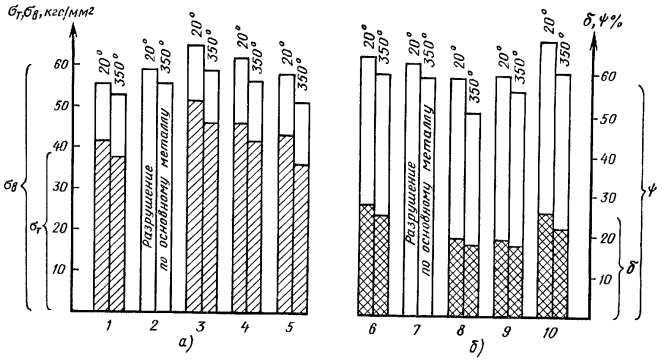


Рис. 79. Механические свойства соединения стали 16ГНМА (заштрихованы значения $\sigma_т$ и δ, без штриховки $\sigma_в$ и ψ):

а) — прочность; *б)* — пластичность; *1* — основной металл после нормализации и отпуска; *2* — соединение без термообработки; *3* — шов после сварки; *4* — шов после отпуска; *5* — шов после нормализации и отпуска; *6* — основной металл после нормализации и отпуска; *7* — сварное соединение без термической обработки; отпуск, нормализация и отпуск; *8* — шов после сварки; *9* — шов после отпуска; *10* — шов после нормализации и отпуска

Кратковременную прочность соединений и металла шва при комнатной и рабочей температуре иллюстрирует рис. 79. Прочность металла шва после отпуска несколько выше, чем у основного металла.

Ударная вязкость у шва на стали 16ГНМА $\delta = 115$ мм даже после сварки находится на уровне основного термически обработанного металла, а после нормализации и отпуска — в 1,5 раза больше, чем у основного металла. Ударная вязкость околошовной зоны такая же, как у основного металла (табл. 13). Получены также хорошие результаты электронно-лучевой сварки за один проход стали марок 22К, 34ХМ1А толщиной соответственно 105 и 90 мм.

13. Ударная вязкость околошовных зон

Место надреза	$a_н$ (кгс·м/см²) при 20 °С			$a_н$ (кгс·м/см²) при —40 °С		
	после сварки	после отпуска	после нормализации и отпуска	после сварки	после отпуска	после нормализации и отпуска
Основной металл	—	—	14,8	—	—	5
Шов	14,5—15,8	15,2—17,3	19—24	6,8—8,5	11,4—13,2	18—22
Околошовная зона от линии сплавления:						
1 мм	11,4—13,1	11,6—13,1	12—12,5	5,2—6,6	5,2—6,8	5,5—7,9
4 мм	12,2—14,1	12,2—14,4	12,1—15,6	6,0—7,8	5,8—7,8	6,2—8,5

Примечание. Приведены результаты испытаний девяти образцов: по три из вершины, середины и корня шва.

Электронно-лучевая сварка также позволяет получать высококачественные соединения пароперегревательных труб мощных котлоагрегатов из стали марок 12Х18Н12Т и 12Х1МФ. Швы, выполненные электронно-лучевой сваркой, не имеют грата, а усиление шва менее 1 мм. Машинное время сварки одного стыка 20 с.

Электронный луч является легко управляемым источником тепла при сварке, что позволяет в широких пределах и очень точно регулировать температуру нагрева изделия, легко перемещать зону нагрева по изделию и переносить энергию на значительные расстояния. Ранее было показано, что электронный луч является более интенсивным источником тепла по сравнению с известными источниками при сварке. Другой важной особенностью электронного луча является то, что плотность энергии в нем можно плавно изменять путем изменения напряженности магнитного поля фокусирующей линзы. Это дает возможность без особых затруднений нагревать изделия в более широком диапазоне температур, чем дугой или газовым пламенем.

Электронный луч является легко управляемым источником нагрева не только возможностью изменения его интенсивности, но и возможностью его перемещения по поверхности изделия.

Метод управления электронным лучом при сварочных работах основан на использования эффекта изменения траектории полета электронов под действием поперечных магнитных полей. Известно, что отклонение потоков электронов магнитными и электрическими полями следует почти безынерционно за отклоняющим полем. Таким образом, изменяя интенсивность и направление поперечных магнитных или электрических полей, можно легко управлять электронным лучом, перемещая его по изделию по любой сложной кривой.

Возможность передвижения луча при неподвижном катоде позволяет создать совершенно новые сварочные устройства, отличающиеся простотой конструкции.

Кроме передвижения электронного луча при помощи отклоняющих систем, появляется возможность изменять форму пятна нагрева за счет изменения очертания катода. При этом можно получить форму нагрева в виде круга, кольца и т. п., что дает возможность производить одновременный подогрев изделий, имеющих сложную форму сечений.

Особенностью электронного нагрева является возможность переноса энергии луча на значительное расстояние от катода без ее потерь. В совокупности с большой концентрацией энергии при малом поперечном сечении луча это дает возможность производить сварку изделий с пространственно расположенными швами при изменении фокусного расстояния в процессе сварки.

При сварке таких изделий электронным лучом наблюдаются некоторые особенности. Ранее было показано, что энергия луча зависит от скорости электронов, движущихся по инерции к изделию, и распределена примерно равномерно по его сечению.

Если же на пути электронного луча встречается отверстие в изделии, то электроны, проникая в отверстие, не участвуют в нагреве свариваемого сечения. В этом случае, если площадь свариваемого металла меньше площади луча, например, при сварке тонких проволок, кольцевых сечений и т. п., то в месте сварки будет выделяться лишь часть энергии луча, равная отношению площади изделия, подвергаемой электронной бомбардировке, ко всей площади луча. При встрече электронов с металлом тепловая энергия, выделившаяся на металле, будет зависеть также и от площади металла, подвергшегося бомбардировке. Это свойство электронного луча приводит к определенному автоматизму изменения количества выделяющейся энергии на изделии при изменении площади свариваемого сечения, что упрощает технологию сварки изделий с переменным сечением.

Со времени создания в 1958 г. первой в СССР лабораторной электронно-лучевой установки в МЭИ электронно-лучевая сварка в вакууме стала в нашей стране промышленным процессом.

Электронно-лучевая сварка находит применение как для соединения малогабаритных изделий электроники и приборостроения, так и для соединения различных крупногабаритных изделий — длиной и диаметром в несколько метров.

Сварка в вакууме может быть осуществлена при наличии специального оборудования: сварочной вакуумной камеры с вакуумной насосной системой, электронной пушки с высоковольтным источником постоянного тока.

Вакуумная камера должна быть газонепроницаемой и достаточно прочной, чтобы выдержать наружное атмосферное давление. Обычно вакуумные камеры имеют вакуумные вводы для передачи вращательных или возвратно-поступательных движений, подачи охлаждающей воды, кроме того, необходимы вакуумные электрические вводы для подачи электрической энергии к катоду, магнитным линзам и т. п.

В вакуумных камерах обычно имеются люки, обеспечивающие загрузку изделий, механизмов и устройств, расположенных внутри камеры. Кроме загрузочных люков, имеются несколько смотровых люков для наблюдения за процессом сварки.

На рис. 80 показана сварочная электронно-лучевая установка. Установка состоит из вакуумной камеры *1*, в верхней части которой размещается электронная пушка *2*, получающая питание электроэнергией от высоковольтного выпрямителя. Для фокусировки электронного луча и возможности управления лучом на пути его установлена электромагнитная фокусирующая линза и отклоняющая система *4*. Внутри камеры может также находиться механизм перемещения изделия *5* с электродвигателем. Питание системы управления пушкой и электрического двигателя механизма перемещения осуществляется через электрический вакуумный ввод. Создание вакуума в камере осуществляется с помощью вакуумной системы. Управление всеми электрическими агрегатами осуществляется с пульта управления. Вакуумная камера выполнена в виде цилиндра. Для наблюдения за процессом сварки в камере и электронной пушке имеются несколько смотровых окон *3* и *6*, изготовленных из свинцового стекла. Внутри камеры расположены приспособления для крепления изделия и механизм перемещения изделия под электронным лучом.

Наибольшее распространение в промышленности СССР получили универсальные установки с многопозиционными сменными механизмами и сравнительно небольшими вакуумными камерами (длиной до 2 м и диаметром до 1 м). Установки

этого типа имеют достаточно мощные вакуумные системы (обычно производительностью 1,0—2,5 тыс. л/с при вакууме $1 \cdot 10^{-4}$—$1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.). Мощность электронно-лучевых пушек до 10—15 кВт.

Универсальный характер установок этого класса позволяет использовать их как в научно-исследовательских лабораториях, так и на промышленных предприятиях.

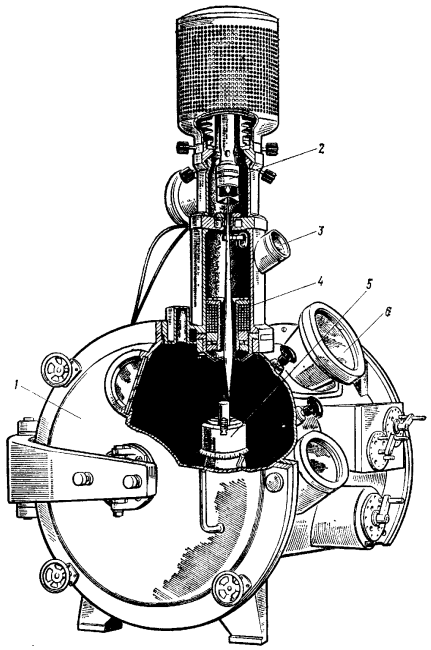


Рис. 80. Сварочная электронно-лучевая установка

Выпускаемые промышленностью СССР установки ЭЛУ универсального типа. Некоторые установки такого типа снабжены механизмом для подачи присадочной проволоки под электронный луч для сварки кольцевых и продольных швов и обеспечивают также возможность сварки криволинейных швов сложного контура в горизонтальной плоскости с помощью копировального устройства. Основным недостатком установок является их низкая производительность — сварка одного изделия за одну откачку. При работе на таких установках в общем цикле работы лишь 2—3% времени составляет сварочный цикл. Большая часть времени расходуется на загрузку изделия, вакуумирование камеры, подготовку камеры к выгрузке изделия и на процесс выгрузки. Малая производительность установок, предназначенных для сварки лишь единичных изделий, является

серьезным препятствием при использовании сварки электронным лучом в производстве, особенно при массовом выпуске изделий.

Установки, которые начинают широко использоваться в промышленности, имеют повышенную производительность — они снабжены магазинными устройствами. В таких установках в рабочих камерах размещают поворотный стол, на котором закрепляют несколько свариваемых деталей. Использование магазинных устройств дает возможность несколько повысить производительность электронно-лучевых установок.

Магазинные устройства, размещаемые внутри рабочей камеры, имеют и свои отрицательные стороны, поскольку стремление к увеличению числа изделий, загружаемых в рабочую камеру для сварки, приводит к увеличению ее объема и, следовательно, к увеличению времени на откачку камеры. Кроме этого, увеличивается время на загрузку и съем изделий. В результате всего этого перерывы между сварочными циклами значительно возрастают. Поэтому использование магазинных устройств не решает полностью проблемы увеличения производительности установок электронно-лучевой сварки.

Наиболее производительными для электронно-лучевой сварки являются установки, в которых ввод изделия в рабочую камеру не меняет величины вакуума в основном объеме камеры. В зависимости от формы и размеров свариваемых изделий, видов сварных соединений и требуемой производительности в настоящее время появилось несколько типов сварочных установок, в которых использованы вакуумные вводы различных конструкций, позволяющие загружать изделия в рабочие камеры без значительного нарушения вакуума. Наличие вакуумного ввода дает возможность резко увеличить коэффициент использования сварочных камер и таким образом повысить выпуск изделий электронно-лучевыми сварочными установками.

Электронные сварочные пушки. Источником тепла при электронно-лучевой сварке является энергия потока ускоренных электронов.

В электронно-лучевых установках электронный луч генерируется и управляется с помощью электронно-оптической системы, называемой электронной пушкой. Поток электронов, эмитируемых катодом, предварительно ускоряется и формируется электростатическим полем в области катод—анод. Ток луча может регулироваться двумя путями: подачей отрицательного напряжения на управляющий электрод или изменением температуры катода. После анода движение электронов происходит по инерции со скоростью, соответствующей приложенной разности потенциалов. Изменение плотности энергии в потоке электронов осуществляется системой электромагнитной фокусировки.

Отклонение луча при необходимости совмещения пятна нагрева с линией стыка или его перемещение по изделию осуществляется системой электромагнитного отклонения луча.

Существует несколько систем электронных пушек: наиболее простыми являются пушки, в которых электронный пучок формируется только с помощью прикатодного электрода, а анодом является изделие (рис. 81, *а*). Недостатками такой пушки являются малое расстояние между пушкой и изделием, недостаточная плотность энергии и отсутствие ее регулирования и т. п.

Несколько более лучшие характеристики имеют пушки, в конструкции которых имеется ускоряющий электрод, находящийся под потенциалом изделия (рис. 81, *б*).

Применение ускоряющего электрода с отверстием для прохождения пучка электронов позволяет увеличить расстояние между катодом пушки и свариваемым изделием, что облегчает наблюдение за процессом сварки, уменьшает опасность электрических пробоев и т. п.

Наиболее совершенными являются пушки с комбинированной электростатической и электромагнитной фокусировкой пучка. Пушка состоит из катода прикатодного электрода, ускоряющего электрода-анода и электромагнитной фокусирующей системы (рис. 81, *в*).

Катоды электронных пушек должны удовлетворять ряду требований: они должны обладать высокими эмиссионными свойствами, устойчиво работать в условиях вакуума, используемого при сварке, иметь достаточную долговечность и др.

Конструктивно катоды сварочных электронных пушек выполняют прямонакальными и с косвенным подогревом (рис. 82). Прямонакальные катоды более просты в изготовлении, но имеют ряд недостатков: трудно обеспечить правильную геометрическую форму эмитирующей поверхности, изменяется форма пучка и др. Катоды с косвенным подогревом имеют более равномерную плотность эмиссии

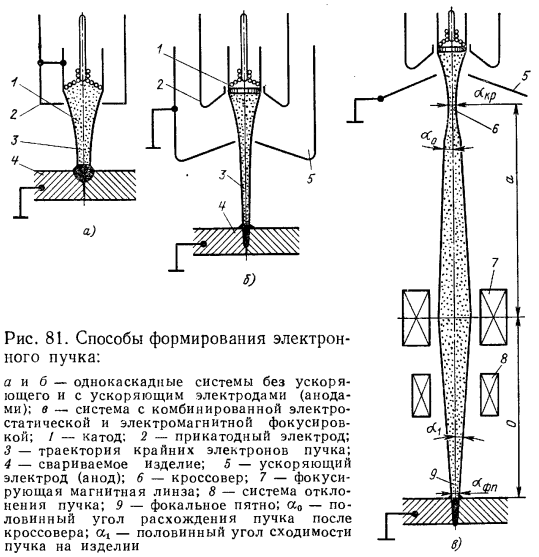


Рис. 81. Способы формирования электронного пучка:

а и *б* — однокаскадные системы без ускоряющего и с ускоряющим электродами (анодами); *в* — система с комбинированной электростатической и электромагнитной фокусировкой; *1* — катод; *2* — прикатодный электрод; *3* — траектория крайних электронов пучка; *4* — свариваемое изделие; *5* — ускоряющий электрод (анод); *6* — кроссовер; *7* — фокусирующая магнитная линза; *8* — система отклонения пучка; *9* — фокальное пятно; α_0 — половинный угол расхождения пучка после кроссовера; α_1 — половинный угол сходимости пучка на изделии

и более долговечны. В некоторых конструкциях сварочных пушек используют подогревные катоды из гексаборида лантана.

Эмиссионные свойства катода из гексаборидлантана превосходят все известные высокотемпературные катоды. Такие катоды достаточно долговечны и при нормальной эксплуатации срок службы их составляет 250—300 ч. Для нагрева боридлантановых катодов до рабочей температуры 1400—1650 °С используются вольфрамовые подогреватели. В сварочных пушках используются сменные катоды из боридлантана с различными диаметрами активной поверхности (3,0; 4,2; 4,75 мм). Такой выбор катодов обеспечивает диапазон мощностей от нескольких ватт до 10—12 кВт.

Затруднения, встречающиеся при конструировании электронных пушек для сварки, имеющих мощные электронные пушки, главным образом состоят в сложности учета действия электростатических сил между зарядами электронов, имеющих одинаковый знак. Наличие такого заряда приводит к расталкиванию электронов в пучке, вследствие чего диаметр поперечного сечения пучка увеличивается. Для уменьшения влияния объемного заряда рассчитывают форму электродов

таким образом, чтобы электрическое поле, возникающее между ними, компенсировало расширение электронного пучка.

Однако при движении электронного пучка к изделию после выхода из межэлектродного пространства, где отсутствует фокусирующее электростатическое поле, поперечное сечение его увеличивается вследствие расталкивающего действия одноименных зарядов электронов. Для того чтобы создать необходимую плотность энергии в электронном пучке, заряды дополнительно фокусируют вторичной фокусирующей системой.

Вторичной фокусирующей системой сварочных пушек являются электромагнитные линзы, выполненные в виде катушки из достаточно большого числа витков; линза размещается в железном экране особой формы. Наличие электромагнитной фокусирующей линзы дает возможность получить острую фокусировку луча в месте сварки, и, кроме того, плотность энергии в луче или диаметр пучка с помощью магнитных линз можно менять в широких пределах путем изменения напряженности магнитного поля линзы.

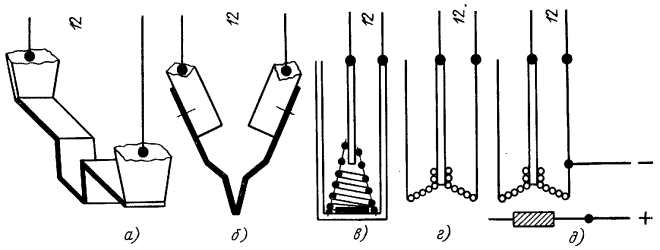


Рис. 82. Типы катодов сварочных пушек:

а — прямоканальный металлический ленточный катод; *б* — V-образный прямоканальный металлический катод; *в* — лантаноборидный катод (LaB_6) с косвенным подогревом; *г* — прямоканальный металлический катод в виде плоской спирали; *д* — катод с косвенным подогревом электронной бомбардировкой

Отклоняющие системы, используемые в электронно-лучевых пушках, предназначены для отклонения луча на заданное расстояние и для точной установки его на кромки свариваемого изделия.

Перемещение электронного луча по изделию может быть осуществлено различными способами: путем механического перемещения изделия под электронным лучом, перемещением пушки или изменением угла наклона ее, воздействием магнитных или электрических полей на электронный луч. В последних конструкциях электронных пушек получили большое применение электромагнитные отклоняющие системы.

Электромагнитные отклоняющие системы изготовляют в виде четырех катушек, соединенных последовательно попарно, расположенных под углом 180° друг к другу. Изменяя ток в катушках, можно устанавливать луч в любой заданной точке. Этот вид отклоняющей системы используется для телевизионных кинескопов. Отклоняющую систему можно использовать для передвижения луча и по сложным кривым: кругу, эллипсу, квадрату и т. п. Электромагнитные отклоняющие системы другого вида изготовляют по типу обмоток роторов электродвигателя.

На рис. 83 представлена современная электронно-оптическая система, предназначенная для сварочных работ. Она состоит из следующих основных узлов: электронной пушки *1*; изолятора *2*; анодного узла *3*; фокусирующей *4* и отклоняющей *5* систем и фланца *6*.

Электронная пушка предназначена для создания мощного сфокусированного электронного луча и состоит из керамической ножки *7*, к которой припаяны медью держатели подогревателя и их выводы и стаканчик *8*. На держателях закреплены подогреватель *9*, катод *10*, фокусирующий и модулирующий экраны *11*. Электронная пушка имеет три сменных катода с поверхностью эмиссии диаметром 3; 4,2; 5,4 мм. Катоды снабжены фокусирующими экранами.

В электронной пушке применен подогревный катод из гексаборидлантана. В зависимости от мощности, требуемой при сварке, на электронную пушку может быть установлен один из трех указанных катодов. Изолятор *2* предназначен для изоляции катода от анода и состоит из керамического баллона, изоляционные свойства которого позволяют выдерживать напряжения до 40 кВ. Анодный узел *3* предназначен для создания ускоряющего поля у катода и формирования луча на выходе из анодного отверстия. Он состоит из анода и двух медных цилиндрических трубок. Анод имеет центральное отверстие, усиленное молибденовой втулкой *12*, и шесть отверстий, расположенных по окружности. Снаружи пушки установлены электромагнитные отклоняющая и фокусирующая системы.

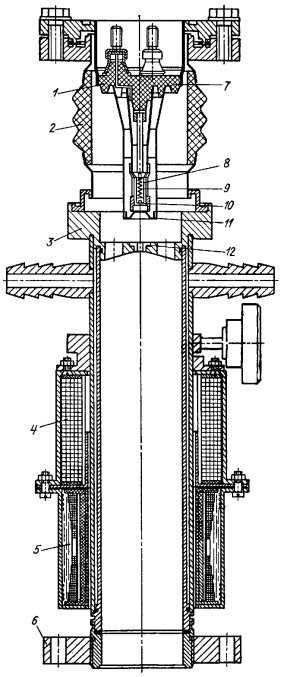


Рис. 83. Сварочная электронно-оптическая система А306

Вакуум-активная защита металлов при сварке. Одной из наиболее сложных задач при сварке плавлением является предотвращение отрицательного воздействия атмосферы на металл сварочной ванны. Помимо атмосферы, при применении различных защитных сред в процессе сварки может происходить окисление жидкого металла свободным кислородом газовой фазы, кислородом, содержащимся в поверхностных окислах металла. Металл шва может насыщаться водородом вследствие диссоциации атмосферной влаги, влаги, содержащейся в ржавчине, электродных покрытиях, флюсах и т. д.

Известно, что присутствие газов в металле шва вызывает снижение его физико-механических свойств. Влияние газов на снижение свойств металлов проявляется по-разному, в зависимости от рода их связи в металле и возможности выделения их при охлаждении и затвердевании металла. Значительное содержание растворенных газов в металле является причиной возникновения пузырей, раковин, пор и уменьшения плотности, металла, что приводит к снижению его пластичности и прочности. Наличие газов в виде химических соединений, таких как окислы, нитриды и гидриды также может значительно уменьшить прочность и, особенно, вязкость металла и вызвать хрупкое разрушение конструкций. Это явление особенно резко сказывается при сварке активных металлов. Окисление металлов, кроме ухудшения механических свойств, понижает их стойкость против коррозии. Окисные включения также могут быть причиной появления газовой пористости, поскольку они сорбируют и удерживают газы в жидком металле. Поэтому

история развития сварочной техники тесно связана с совершенствованием сред, используемых для защиты ванны расплавленного металла.

Появление новых, более совершенных защитных средств сопровождается качественными изменениями в сварочной технике. Это объясняется тем, что новый вид защиты принципиально изменяет процесс сварки, вызывая не только улучшение качества металла, но и изменение свойств и характеристик источника нагрева. В результате может быть повышена производительность, стабилизировано качество металла, автоматизирован процесс сварки, расширена область применения ее и т. п. В связи с этим считается закономерным, что с появлением нового вида защиты, даже при одном и том же источнике тепла, рождается новый метод сварки.

Так, при дуговой сварке защита, получаемая при расплавлении толстых обмазок, не только коренным образом улучшила качество металла шва, но и в значительной степени повысила производительность процесса сварки.

Создание флюсовой защиты коренным образом изменило технологический процесс дуговой сварки, позволив во много раз повысить производительность, в значительной степени улучшить и стабилизировать качество металла шва и открыть путь широкой автоматизации процесса.

Использование инертных газовых сред при дуговой сварке расширило область ее применения, решило проблему сварки ряда цветных металлов (алюминий, медь, магний, титан и др.) и сплавов на их основе и позволило автоматизировать процесс.

Значительные успехи, полученные при использовании в качестве защиты углекислого газа, дали возможность при сварке черных металлов осуществлять соединения в любых пространственных положениях, значительно удешевить процесс и решить ряд других сложных проблем. Каждый вид защиты широко применяется в промышленности и каждый из них имеет свою область, в которой он является наиболее рентабельным.

За последние годы, в связи с развитием новой техники, значительно возросли требования к качеству сварных соединений применяемых металлов. Кроме того, возникла необходимость применения тугоплавких и химически активных металлов. Тугоплавкие и активные металлы, выплавляемые в вакуумных печах, обладают высокими свойствами. Однако применяемые защитные среды при сварке таких металлов лишают их в значительной степени тех достоинств, которые ими были получены при вакуумной выплавке. Это объясняется тем, что названные металлы обладают высокой химической активностью при незначительном повышении температуры. Поэтому применение обмазок и сварка под флюсом большинства таких металлов исключены в связи с тем, что составляющие защитных сред, реагируя с расплавленным металлом, вызывают насыщение его вредными примесями и неметаллическими включениями.

Такие металлы, как цирконий и тантал, реагируя с многими известными флюсами и являясь геттерами, улавливают даже ничтожное количество активных газов. Поэтому использование нами и зарубежными исследователями инертных газов при сварке выявило несовершенства и ограничения применения этого метода защиты. Применительно к некоторым из этих металлов даже эффективная защита промышленными инертными газами является недостаточной.

При сварке в аргоне последний наряду с защитными свойствами вносит загрязнения в металл за счет присутствующих в нем примесей и влаги. Следовательно, при использовании редких и тугоплавких металлов в сварных конструкциях, а также при увеличении требований к качеству сварных соединений широко применяемых металлов возникает необходимость изыскания более совершенных способов защиты металлов при сварке.

Влияние вредных примесей в защитных газовых средах можно иллюстрировать на примере сварки молибдена. Установлено, что при сварке молибдена в инертной атмосфере металл сварного соединения имеет низкую пластичность. Одной из вероятных причин образования трещин, пористости и низкой пластичности сварных соединений молибдена является наличие примесей в основном металле и загрязнение атмосферными газами металла шва в процессе сварки.

Исследование влияния содержания кислорода в основном металле на пластичность металла шва показало, что кислород, являясь наиболее опасной примесью, резко снижает пластические свойства молибдена. Так, увеличение содержания кислорода в основном металле с 0,004 до 0,01% уменьшает угол загиба металла шва почти в 10 раз. Расчетным путем показано, что лишь при содержании кислорода в металле шва менее 0,002% температура его порога хрупкости становится равной температуре порога хрупкости основного металла. Такой низкий предел допустимого содержания кислорода в металле шва требует очень малого содержания кислорода в защитной атмосфере, применяемой при сварке.

Расчеты по определению требований к чистоте инертной атмосферы на содержание в ней кислорода с учетом размеров зерна металла шва и содержания в нем окислов показывают, что при аргонодуговой сварке содержание кислорода в инертном газе не должно превышать 0,003%. Лучший аргон, поставляемый промышленностью, содержит кислорода примерно в 2 раза больше требуемого по расчету, причем содержание кислорода может увеличиваться в процессе сварки за счет проникновения воздуха в зону сварки, что приводит к дальнейшему снижению качества металла шва.

14. Содержание газов в единице объема при различных давлениях

Давление, мм рт. ст.	Содержание газов в единице объема, %		
	Всего	В том числе	
		O_2	N_2
76,0	100	20,1	79,0
1	0,13	0,03	0,1
$1 \cdot 10^{-1}$	0,013	0,003	0,01
$1 \cdot 10^{-2}$	0,0013	0,0003	0,001
$1 \cdot 10^{-3}$	0,00013	0,00003	0,0001
$1 \cdot 10^{-4}$	0,000013	0,000003	0,00001

Значительное ухудшение свойств металла шва происходит также под воздействием азота воздуха. В процессе дуговой сварки в инертных газах расплавленный молибден может поглощать азот в больших количествах. Присутствие азота в металле шва, так же как и кислорода, значительно снижает прочность и, особенно, пластичность молибдена.

Присутствие водорода или паров воды в атмосфере при сварке в ряде случаев недопустимо. Водород легко адсорбируется цирконием, танталом и ниобием с образованием гидридов, располагающихся в виде прослоек между зернами. Присутствие водорода в металле также отрицательно сказывается на его свойствах. Даже небольшое количество водорода в цирконии, тантале и ниобии может вызвать их пористость и уменьшить пластичность и прочность.

Для получения сварных швов, обладающих достаточной пластичностью, при сварке активных и тугоплавких металлов следует использовать защитную среду с минимальным содержанием кислорода, азота, водорода и паров воды.

Положительные результаты, полученные в металлургии при использовании вакуума при плавке металлов, являются основанием для использования этого вида защиты применительно к сварке плавлением. Использование вакуума в условиях сварочного процесса, характеризующегося относительно малым объемом расплавленного металла, кратковременностью его пребывания в жидком состоянии и высокими градиентами температур, связано с рядом особенностей действия вакуума на расплавленный металл. Свойства вакуума как защитной среды определяются наличием примесей в единице объема вакуумной камеры. Представление о чистоте среды при сварке в вакууме и ее защитных свойств можно получить путем сопоставления количества примесей в единице объема вакуума и инертных газов, обычно применяемых при сварке.

Расчеты состава атмосферы и количества примесей в единице объема показывают (табл. 14), что даже при относительно плохом вакууме достигается достаточно малое содержание примесей в единице объема.

Сварка в вакууме при давлении только в 0,1 мм рт. ст. лучше, чем в особо чистом и дорогом аргоне марки А, содержащем 0,005% O_2 и 0,01% N_2.

Если учесть, что при сварке из металла выделяются газы, в состав которых входят CO, CO_2, H_2, то парциальное давление кислорода и азота в камере будет ниже приведенных в табл. 14.

Высокие защитные свойства вакуумной среды подтверждены экспериментально при сварке активных и тугоплавких металлов путем сравнения качества металла швов, выполненных дугой в камере с аргоном и электронным лучом в вакууме. Так, при сварке циркония, который является одним из наиболее активных

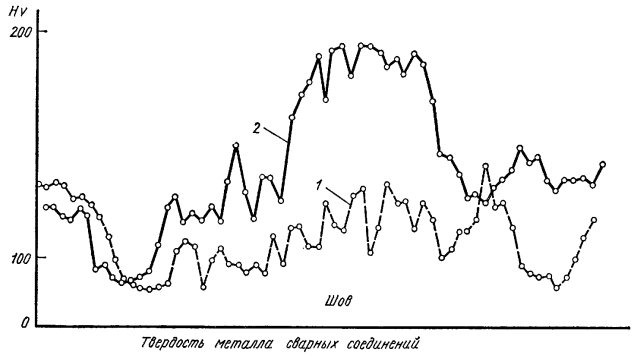


Рис. 84. Изменение твердости металла шва циркония, выполненного электронно-лучевой сваркой (*1*) и дугой в камере с контролируемой атмосферой (*2*)

геттеров, изменение твердости показало (рис. 84), что твердость металла в зоне шва, выполненного в камере с аргоном, почти в 2 раза больше твердости металла, сваренного в вакууме. При сварке в вакууме твердость металла шва близка к твердости основного отожженного металла. Значительное уменьшение твердости металла при сварке в вакууме объясняется более совершенной защитой, вследствие чего отсутствует загрязнение расплавленного и нагретого до высоких температур металла кислородом и азотом воздуха.

Уменьшение содержания газов в металле шва путем вакуумной защиты приводит к значительному улучшению его пластичности.

15. Увеличение пластичности металла шва при использовании вакуумной защиты при сварке очень чувствительного к газам металла — молибдена

Основной металл	№ партий основного металла	Угол загиба (градусы) образцов, сваренных		Примечание
		в вакууме электронным лучом	в гелии дугой вольфрамовым электродом	
Плавленый	1	55—100	35—55	В основном металле 0,004% O_2 и до 16 мл/100 г H_2
	2	28—47	10—28	В основном металле 0,006% O_2
Порошковый	4П	5—15	0—10	В основном металле до 0,01% O_2 и до 19 мл/100 г H_2

Из табл. 15 видно, что наибольшей пластичностью обладают швы из молибдена партии 1, минимально загрязненного кислородом. Пластичность соединений, выполненных в вакууме, во всех случаях почти в 2 раза выше пластичности соединений, сваренных в камере с контролируемой атмосферой.

Снижение степени загрязнения металла влечет за собой повышение чистоты границ зерен, что значительно улучшает устойчивость металла шва против коррозии. Сравнительные испытания на коррозионную стойкость металла шва циркония показывают, что скорость коррозии сварных швов, выполненных в камере с аргоном, несколько выше скорости коррозии швов, выполненных в вакууме.

Изучение действия вакуума на расплавленный и нагретый металл показывает, что вакуум является не только защитной средой, предохраняющей металл от действия атмосферы, но роль его состоит также в ускорении и в более полном завершении термодинамических процессов, протекающих в расплавленном и нагретом металле.

Кинетическая роль вакуума наиболее ярко проявляется в резком ускорении выхода газов из металла, а термодинамическая — в значительно более полном удалении примесей.

Установлено, что вакуумная среда активно воздействует на нагретый расплавленный металл сварного соединения, обеспечивая его дегазацию, повышение плотности, удаление окислов, примесей и загрязнений как с поверхности, так и из внутренних слоев металла.

Одним из наиболее распространенных пороков, встречающихся в сварных швах, являются газовые поры. Газовая пористость возникает в результате наличия в жидком металле избыточного количества газов, которые с понижением температуры металла выделяются из него вследствие уменьшения их растворимости. Эти газы, коагулируя, приводят к образованию пузырьков, которые, не успевая всплыть на поверхность, образуют поры в закристаллизовавшемся металле и на разделе твердой и жидкой фаз.

Причиной образования пор является повышенное содержание газов, которые попадают в сварочную ванну вследствие воздействия атмосферы и компонентов защитной среды или присутствуют в свариваемом металле.

Существует ряд способов борьбы с газовыми порами при сварке плавлением. Однако эта проблема еще полностью не решена вследствие того, что основная причина — насыщение металлов газом — при существующих способах защиты при сварке не устраняется.

Использование вакуумной защиты при сварке является одним из наиболее совершенных методов предупреждения образования пор в металле шва.

Сварка в вакууме дает возможность полностью устранить причины, вызывающие образование газовых пор, вследствие отсутствия над сварочной ванной газовой среды, из которой могло бы происходить поглощение газов металлом. Кроме того, вакуум активно способствует устранению пор за счет удаления газов из основного металла.

Создание вакуума над ванной расплавленного или нагретого твердого металла сопровождается повышением скорости удаления газа из жидкого металла в виде пузырьков и повышением скорости выделения газов за счет увеличения скорости диффузии в твердом металле.

Если металл находится в жидком состоянии, то создаются благоприятные условия для удаления газов в вакууме при сварке вследствие ускорения диффузии, улучшения условий образования пузырьков газов и увеличения скорости их выхода из расплавленного металла.

Пониженное давление способствует образованию газовых пузырьков в расплавленном металле. Возникновение газового пузыря в жидком металле шва возможно в том случае, если давление выделяющегося газа в состоянии преодолеть внешние силы, препятствующие его выделению.

При сварке в атмосфере силы внешнего давления, препятствующие образованию газового пузыря, слагаются из атмосферного давления, металлостатического

и давления поверхностной пленки металла на пузырь. При сварке в атмосфере

$$p_{вн} = p_{атм} + h\gamma + \frac{2\sigma}{r}, \quad (28)$$

где $p_{атм}$ — атмосферное давление, ат; h — высота столба металла, см; γ — плотность металла, кг/м³; σ — поверхностное натяжение металла на границе раздела металл—газ, кгс/м; r — радиус пузыря, м.

Для условий сварки в вакууме атмосферное давление p, измеряемое десятитысячными долями мм рт. ст., практически не оказывает противодействия образованию газовых пузырьков вследствие очень малой величины. Внешнее давление $p_{в1}$ в этом случае является в основном функцией силы поверхностного натяжения и размеров пузырька, так как металлостатическое давление металла мало вследствие малой глубины сварочной ванны расплавленного металла.

Поэтому можно написать, что при сварке в вакууме

$$p'_{вн} = \frac{2\sigma}{r}. \quad (29)$$

Как видно, уменьшение внешнего давления не только значительно облегчает условия образования газовых пузырьков, но и обеспечивает выход на поверхность расплавленного металла значительно более мелких пузырьков, которые при наличии внешнего давления обычно остаются в металле. Ускорение выделения газов в виде пузырьков из жидкого металла в вакууме объясняется также и тем, что работа образования зародышей газовых пузырьков уменьшается, а скорость перемещения их увеличивается. В ряде работ по плавлению металлов в вакууме показано, что основное количество газов удаляется из металла в момент его перехода из твердого в жидкое состояние. Это обстоятельство является чрезвычайно важным для процесса сварки, так как указывает на возможность почти полной дегазации металла за короткое время пребывания его в жидком состоянии.

Немаловажным обстоятельством, уменьшающим содержание газов в металле при сварке в вакууме, является возможность удаления поверхностных загрязнений (адсорбированных газов, жидкостей и поверхностных окисных пленок).

Работы по сварке многих активных и тугоплавких металлов показали, что при сварке в вакууме металл шва получается без пор, т. е. устраняется наиболее распространенный вид дефекта сварных швов.

Однако при сварке в вакууме газонасыщенных металлов в металле шва наблюдались поры. Так, поры возникали при сварке ниобия. Микроисследования и рентгенография сварных соединений ниобия показали, что на линии сплавления основного металла и металла шва наблюдается цепочка крупных газовых пор (рис. 85, *а*, *в*).

Наличие пор в металле сварного соединения значительно снижает механические свойства металла шва. Испытания стыковых сварных соединений нисбия, выполненных электронным лучом на металле в состоянии поставки, показали предел прочности 5—8 кгс/мм² и очень малый угол загиба. При испытаниях разрушение соединений происходило по линии сплавления, содержащей поры.

Использование вакуумной защиты металлов дало возможность получить сварные соединения без пор при сварке газонасыщенного металла. Для устранения пор в металле сварного соединения была произведена предварительная дегазация основного металла путем нагрева расфокусированным лучом в глубоком вакууме. Для значительного улучшения свойств сварного соединения оказалось достаточным произвести дегазацию лишь кромок свариваемых листов ниобия на относительно небольшой ширине (10—15 мм). Дегазация кромок производилась путем последовательного прогревания каждой кромки электронным лучом примерно до 1000—1200°С. После дегазации производилась сварка электронным лучом на обычном режиме. Такая относительно несложная операция дала возможность полностью устранить поры в металле сварного соединения (рис. 85, *б*, *г*) и вследствие этого значительно улучшить его механические свойства.

Сварка дегазированного ниобия повысила прочность сварного соединения до прочности основного металла ($\sigma_в$ = 40 кгс/мм²). При этом одновременно были улучшены и пластические свойства металла сварного соединения — угол загиба в швах металла, сваренного с предварительной дегазацией, составил 180°.

Установлено, что при использовании вакуума в качестве защитной среды при сварке имеется принципиальная возможность уменьшить содержание газов в некоторых металлах за счет процессов диссоциации окислов, нитридов и гидридов.

Наиболее легко из металлов удаляется водород, даже в том случае, если он находится в связанном состоянии. Большинство соединений металла с водородом уже при относительно низких температурах нагрева разлагается. Таким

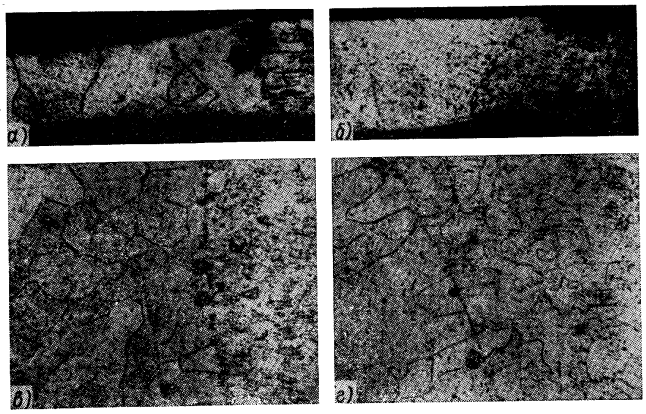


Рис. 85. Сварное соединение ниобия, выполненное электронным лучом (×70):

а, *б* — сварное соединение с порами при сварке газонасыщенного ниобия; *в*, *г* — сварное соединение без пор при сварке дегазированного ниобия

образом, в условиях сварки в вакууме большая часть водорода, содержащегося в металле, может быть удалена из металла.

Удаление из металла связанного кислорода и азота может быть успешным только в том случае, если парциальное давление газов в камере будет ниже упругости диссоциации окислов и нитридов при температурах сварочной ванны.

Если в сварочной камере поддерживать давление $5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст., что соответствует парциальному давлению кислорода примерно $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст., то только окислы меди, никеля и кобальта могут диссоциировать при температурах, имеющих место в сварочной ванне. Таким образом, для этих металлов возможно раскисление путем диссоциации их окислов при сварке в вакууме.

Возможность удаления окислов из металлов, имеющих высокую упругость диссоциации в условиях сварки в вакууме, была подтверждена экспериментами при сварке меди в вакууме. Примерное содержание кислорода в металле составляло 0,05—0,07%. После сварки меди в вакууме она практически полностью освободилась от закиси меди.

Возможности практического использования процессов диссоциации при сварке в вакууме ограничиваются свойствами окислов некоторых металлов. Рас-

смотрение этого процесса показывает, что в условиях сварки в вакууме нельзя удалить кислород из подавляющего большинства металлов, кроме Cu, Ni, Co, путем диссоциации их окислов вследствие чрезвычайно низкого парциального давления кислорода.

Нитриды таких металлов, как Al, Nb, Cr, Mg, Mo, Si, Ta, имеют относительно высокую упругость диссоциации в условиях, существующих при сварке в вакууме. Вследствие этого имеется практическая возможность удаления азота из металла путем диссоциации его нитридов, кроме нитридов циркония и титана, обладающих низкой упругостью диссоциации.

Известно, что на поверхности металла всегда имеются пленки из окислов, жидкостей (масла, воды) и адсорбированных газов, присутствие которых при сварке во многих случаях нежелательно вследствие того, что это может препятствовать сплавлению кромок металла, вызвать появление пор в металле шва и явиться причиной понижения физико-механических свойств сварных соединений.

При сварке химически активных металлов наличие окислов и загрязнений является одним из главных факторов, препятствующих получению качественного сварного соединения.

Поэтому удаление окислов и загрязнений с поверхности свариваемых кромок большинства металлов является очень важной проблемой и в ряде случаев определяет качество сварного соединения. Особенно важное значение имеет предварительная очистка кромок при сварке циркония, молибдена и других металлов, склонных к поглощению различных газов при нагреве, а также при сварке пористых металлов.

Установлено, что активное воздействие вакуумной защиты при сварке дает возможность освободиться от поверхностных загрязнений, адсорбированных газов и жидкостных пленок. Обычно после нагрева в вакууме поверхность металла в широкой зоне, прилегающей к свариваемым кромкам, становится блестящей.

Технико-экономические преимущества сварки в вакууме. Несовершенство широко используемых при сварке способов защиты металлов приводит в ряде случаев к получению швов с пониженными эксплуатационными свойствами. Это происходит вследствие недостатков защитных свойств применяемых сред; сложности состава обмазок и флюсов, качество которых определяется природными материалами, имеющими значительные колебания химического состава; сложности технологии изготовления и изменения свойств обмазок и флюсов, особенно при их длительном хранении; затруднения контроля качества готовых покрытий и флюсов. Все это является причиной непостоянства действия защитных средств, вызывая неоднородность свойств металла шва.

Совершенствование защитных сред, используемых при сварке, идет в направлении упрощения их состава. Многокомпонентные обмазки и флюсы в некоторых случаях успешно заменяются менее сложными газовыми средами или инертными газами. Легкость контроля химического состава газов и относительное постоянство их свойств как защитной среды дает возможность повысить стабильность и качество швов при сварке цветных и легких металлов и специальной стали.

Использование вакуумной защиты дает ряд технических и экономических преимуществ перед применяемыми способами защиты при сварке. Это объясняется тем, что вакуумная защита состоит из компонента «нулевого» порядка. Наименьшая сложность состава защиты обеспечивает легкость получения, ее дешевизну и простоту контроля.

Выпускаемое отечественными заводами современное вакуумное оборудование дает возможность создавать совершенную защитную среду для сварки непосредственно на рабочем месте, при этом отпадает зависимость сварочного производства от заводов, производящих защитные газы, сокращается потребность в баллонах, отпадают транспортные расходы и т. п.

С экономической точки зрения к преимуществам вакуумной защиты можно отнести отсутствие инертных газов, которые, несмотря на широкое применение в промышленности, все еще дороги, дефицитны, имеют большое количество примесей и, даже будучи абсолютно чистыми, не могут дать тех положительных результатов, которые дает вакуумная среда.

Экономическая целесообразность применения вакуумной защиты при сварке определяется не только увеличением физико-механических показателей металла сварного соединения, но также и тем, что затраты на создание вакуумной защиты значительно меньше, чем при сварке в инертных газах.

Расчеты показывают, что сварка в вакууме оказывается почти в 2 раза дешевле сварки в атмосфере аргона. По стоимости защитной среды сварка в вакууме приближается к стоимости сварки в углекислом газе (рис. 86). По зарубежным данным, при учете только эксплуатационных расходов (стоимость электроэнергии, инертного газа и т. д.) сварка электронным лучом оказывается в 35 раз дешевле сварки в камерах с контролируемой атмосферой.

Из рис. 86 видно, что даже в том случае, если процесс сварки в камере длится 60 мин, стоимость создания вакуумной защиты примерно в 2,5 раза меньше стоимости создания контролируемой атмосферы из аргона.

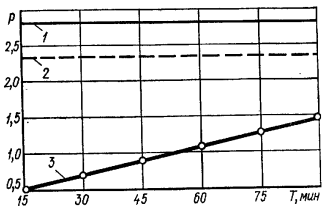


Рис. 86. График сравнительной стоимости (руб.) создания инертной атмосферы и вакуумной защиты для камеры объемом 1 м³:

T — время сварки в камере; *1* — сварка в чистом аргоне; *2* — сварка в техническом аргоне; *3* — сварка в вакууме

«Нулевой» порядок состава защиты значительно упрощает контроль ее качества, который сводится к контролю показаний обычного стрелочного прибора на вакуумметре. Упрощение контроля состава защиты обеспечивает получение стабильных результатов при сварке.

Преимущества вакуумной защиты показывают, что при любом способе сварки применение вакуумной среды — более совершенный метод защиты, позволяющий не только обеспечить идеальную защиту металла, но активно на него воздействовать с целью получения высокого качества сварных соединений любых металлов и неметаллических материалов. Вакуумная среда является наиболее эффективной и экономичной, а в ряде случаев единственной, позволяющей осуществить сварку некоторых конструкций.

Современное состояние электронно-лучевой сварки характеризуется серьезными научными результатами в области изучения процесса электронно-лучевой сварки, свойств сварных соединений различных материалов, технологии сварки неметаллических материалов (керамики на основе окислов алюминия, карбидов и др.), получения соединений высокотемпературных неметаллических материалов с металлами.

СВАРКА СВЕТОВЫМ ЛУЧОМ

Создание и современное развитие квантовой электроники связано с работами лауреатов Ленинской и Нобелевской премий академиков Н. Г. Басова, А. М. Прохорова.

Квантовые генераторы оптического диапазона появились сравнительно недавно, но уже сейчас с их помощью можно получать интенсивные и остронаправленные пучки света и концентрировать энергию на очень малые площадки, равные тысячным долям миллиметра. Созданное на этом принципе технологическое оборудование позволяет обрабатывать различные материалы, производить сварку, резку, термическую обработку и т. п.

В основу принципа действия квантового генератора и усилителя положено индуцированное излучение, которое связано с поглощением электромагнитных

волн или фотонов атомными системами. При поглощении фотона его энергия передается атому, который переходит в «возбужденное» квантовое состояние.

Через некоторый промежуток времени атом может спонтанно излучить эту энергию в виде фотона и возвратиться в основное состояние. Пока атом находится в возбужденном состоянии, его можно побудить испускать фотон под воздействием внешнего фотона («падающей волны»), энергия которого в точности равна энергии фотона, испускаемого атомом при спонтанном излучении. Такое излучение называется индуцированным.

В результате падающая волна усиливается волной, излучаемой возбужденным атомом. Важным в этом процессе является то, что испускаемая волна в точности совпадает по фазе с той, под действием которой она возникла. Это явление используется в квантовых усилителях. Квантовые генераторы преобразуют электрическую, световую, тепловую или химическую энергию в монохроматическое когерентное излучение электромагнитных волн: ультрафиолетового, видимого и инфракрасного диапазона.

Излучателем — активным элементом могут быть твердые тела: стекло с неодимом, рубин, гранат с эрбием и др. Квантовые генераторы на алюмонатриевом гранате с неодимом позволяют получать мощность до 1 кВт в непрерывном режиме.

В качестве излучателя используются также различные жидкости: растворы окиси неодима, красители и др. Жидкостные квантовые генераторы на неорганических жидкостях по своим характеристикам ближе всего стоят к твердотельным импульсным генераторам, но превосходят их по энергии в импульсе вследствие больших объемов активных элементов.

Излучателями могут быть также газы и газовые смеси; водород, азот, аргон, углекислый газ и др. У таких генераторов самый широкий спектральный диапазон излучения и наибольшая мощность в непрерывном излучении при достаточно высоком КПД (15—20%).

В последнее время в качестве излучателей используют также полупроводниковые монокристаллы: арсениды галлия и индия, сплавы кадмия с селеном и серой и др. Генераторы с полупроводниковым излучателем обладают малым весом, экономичны и имеют самый высокий КПД (до 0,70).

Излучатель возбуждается и генерирует свет под действием энергии системы накачки: твердотельные и жидкие активные элементы возбуждаются светом импульсных ламп; газовые смеси в основном накачиваются энергией газового разряда; полупроводниковые излучатели используют энергию электрического тока, протекающего через область p—n-перехода. Разработаны системы, которые позволяют использовать для накачки газовых лазеров тепло и энергию химических реакций. В зависимости от энергетических параметров системы накачки лазер работает в импульсном или непрерывном режиме.

В квантовых технологических генераторах обычно в качестве основного энергетического элемента используют рубин. Рубин — это окись алюминия, в которой небольшое число атомов алюминия замещено атомами хрома. Обычно в квантовых генераторах используют бледно-розовый рубин, содержащий 0,05% Cr.

Используемый в лазере [*1] розовый кристалл рубина обрабатывается в виде стерженька, длина и диаметр которого определяют мощность излучения. Его торцы полируют до получения оптически плоской поверхности, затем их подвергают серебрению для получения отражающих поверхностей. Выходной конец кристалла является полупрозрачным. Рубиновый стерженек помещают вблизи электронной лампы вспышки, служащей источником широкополосного света для оптической накачки. Энергетическая схема квантового генератора на рубине показана на рис. 87.

В квантовом генераторе на кристалле рубина атомы хрома, находящиеся в исходном состоянии (*I*), поглощают фотоны (волнистые стрелки) и переходят

[*1] Лазер — термин появился от сочетания следующих первых букв слов: light amplification by stimulated emission of radiation (усиление света путем использования индуцированного излучения).

на один из вышерасположенных уровней (*II*). Часть энергии они передают кристаллической решетке, вызывая повышение температуры, и переходят при этом в метастабильный уровень (*III*). Затем под действием индуцирующих фотонов, испускаемых другими атомами хрома, они излучают фотоны характеристической длины волны, возвращаясь опять в исходное состояние (*IV*).

Лазер на кристалле рубина питается от импульсной лампы. При освещении лампой вспышкой рубинового стерженька большинство атомов хрома переводится в возбужденное состояние. При спонтанном испускании возбужденным атомом фотона параллельно оси кристалла фотон побуждает другой возбужденный атом испустить второй фотон (индуцированный). Этот процесс продолжается лавинообразно, поскольку фотоны, отражаясь от торцов кристалла, движутся по кристаллу в осевом направлении. Интенсивность пучка растет в результате многократного отражения от обоих торцов стержня. В этом случае, если интенсивность света от импульсной лампы превысит некоторый критический уровень, начинает появляться эффект квантового усиления и тогда с полупрозрачного торца в течение тысячных долей секунды выбрасывается интенсивный поток фотонов с длиной волны 6943 Å. Выходной пучок является узконаправленным, мощным, монохроматическим и когерентным.

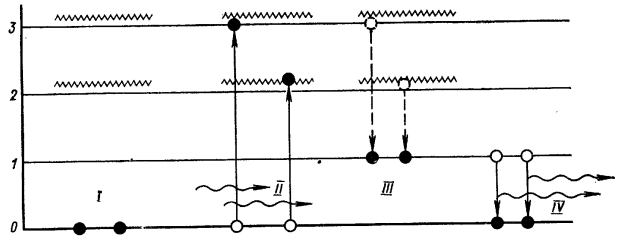


Рис. 87. Энергетическая схема квантового генератора на кристалле рубина

Излучение является узконаправленным вследствие того, что испускаются волны, лишь тысячекратно отраженные и не испытавшие сколько-нибудь существенного отклонения от оси прибора. Это излучение является мощным, так как индуцированное излучение возбужденных атомов происходит гораздо раньше, чем произошло бы спонтанное излучение.

Высокая степень монохроматичности излучения обусловлена тем, что индуцированное излучение представляет собой резонансный процесс и в силу этого более привязано к центру полосы частот, чем излучение, спонтанно испускаемое атомами. Эти предпочтительные частоты возбуждают, в свою очередь, излучение на той же частоте, так что волна в квантовом генераторе содержит чрезвычайно узкий интервал частот и длин волн. Обычный белый световой луч, состоящий из электромагнитных волн различной длины, фокусируется линзой в значительном объеме вследствие дисперсии света, различной степени преломления стеклом линзы световых волн различной длины. Дисперсия света приводит к тому, что узкий пучок белого света, проходя линзы, уширяется, образуя спектр.

Монохроматический световой луч лазера состоит из электромагнитных волн одной длины, и поэтому такой луч фокусируется в очень малом объеме, практически в точке (рис. 88).

Плотность энергии светового луча в фокусе линзы определяется как $\rho = \frac{E}{V}$, где ρ — плотность энергии; E — энергия луча; V — объем фокуса. Так как

объем фокуса для белого луча имеет значительные величины вследствие дисперсии света, то плотность энергии в фокусе такого луча невелика. Для луча лазера объем фокуса очень мал ($V \to 0$), а плотность энергии в фокусе имеет очень большие значения и может достигать 10^7 — 10^8 Вт/см^2. Однако время импульса мало и составляет 10^{-9}, с.

КПД квантовых генераторов на рубине невелик и составляет $\sim 0{,}1\%$.

Создание мощных квантовых генераторов, обладающих большим КПД, по-видимому, в ближайшем будущем приведет к необходимости пересмотра установившихся взглядов на ряд существующих технологических процессов.

Несмотря на низкий КПД оптических квантовых генераторов на рубине, генераторы этого типа находят практическое применение при сварке. На рис. 89 представлена схема сварочного квантового генератора на рубине.

Сварочная установка представляет собой комплекс оптико-механических и электрических элементов, основным из которых является оптический квантовый генератор на рубиновом кристалле.

Установка состоит из генератора, блока питания, стола с конденсаторами и стереоскопического микроскопа.

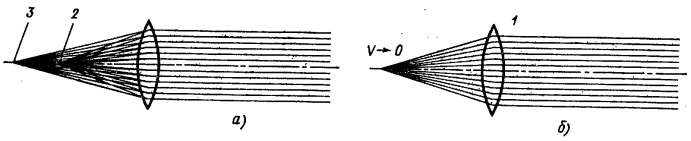


Рис. 88. Фокусирование линзой белого (*а*) и монохроматического (*б*) лучей:
1 — фокусирующие системы; *2* и *3* — фиолетовый и красный лучи

Генератор предназначен для преобразования энергии, запасенной в блоке конденсаторов, в узконаправленный, монохроматический, когерентный световой пучок.

Основным узлом генератора является осветительная камера *1* (рис. 89, *а*), внутри которой вставлен кристалл рубина *2*. В камере параллельно кристаллу установлена импульсная лампа *3*, на концы которой подводится высокое напряжение. Внутренняя поверхность камеры отполирована и является отражателем света. В камеру подается сжатый воздух для охлаждения кристалла рубина. Использованный воздух уходит в атмосферу. Для формирования испускаемого кристаллом рубина излучения и направления его на место сварки служит формирующая оптическая система, состоящая из призмы *4*, линзы и сменного объектива *5*. Формирующая система снабжена сменными объективами, которые фокусируют параллельный пучок света, испускаемый генератором, в пятно диаметром 0,25—0,05 мм. Для настройки генератора используют оптическое устройство, состоящее из осветителя *6*, призмы *7*, и конденсорной линзы *8*. Луч света от осветителя проходит через рубин и оптическую систему генератора, имитируя прохождение излучения от кристалла (рис. 89, *б*). Для визуального наблюдения за местом сварки при наведении луча подсветки на место сварки и для осмотра сваренных элементов служит стереоскопический микроскоп *9*. Для защиты глаз оператора, работающего на установке, от излучения генератора в момент вспышки-сварки предусмотрен затвор *10*, приводимый в движение электромагнитом.

Электрическая схема установки состоит из блока питания импульсной лампы, стола с входящим в него затвором и трансформатором подсветки, генератора. На лампу вспышки подается напряжение, равное 18 кВ.

Для изменения времени разряда и, следовательно, времени горения лампы в цепи лампы установлены индуктивности, меняя величину которых, можно менять и время длительности импульса.

Резка лазером является наиболее распространенной технологической операцией. Лазером можно резать стекла, керамики, алмазы, металлы и др. При резке используют лазеры непрерывного действия, обладающие большими энергиями излучения в инфракрасном диапазоне (длина волны равна 10,6 мкм). Резка кремниевых и германиевых пластин на отдельные элементы, необходимые в полупроводниковой промышленности, осуществляется воздействием сфокусированного луча лазера непрерывного действия. При этом происходит испарение части ма-

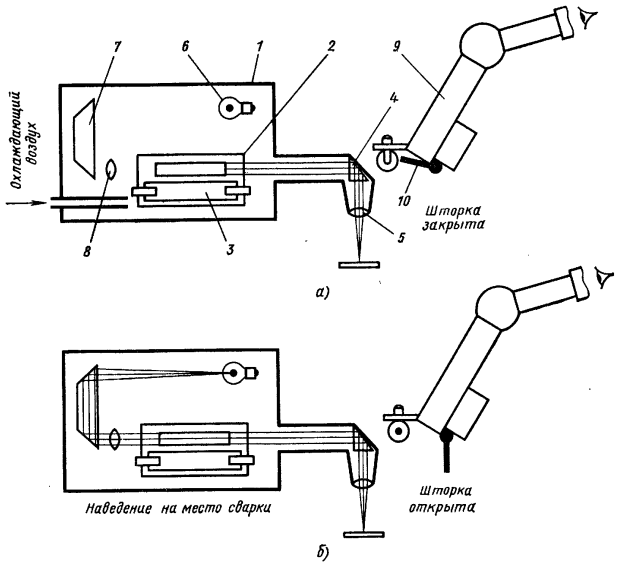


Рис. 89. Схема сварочного квантового генератора:
а — сварка; *б* — настройка генератора перед сваркой

териала на поверхности пластины и образуется канавка. В дальнейшем необходимо приложить механическое усилие, и пластины расколются по линиям канавок. Аналогичными резке являются процессы подгонки резисторов и обработки интегральных схем. Лазерный луч испаряет части металлической пленки резистора, при этом электрическая цепь может находиться под напряжением, что обеспечивает непрерывный контроль сопротивления прибора. Обработку можно производить в атмосфере, в вакууме и различных газах, при этом луч лазера может свободно проникать через стекло, кварц, воздух. Так как квантовый генератор на рубине имеет КПД порядка 0,1%, то только 0,001 доля номинальной энергии поджига газоразрядной лампы превращается в энергию луча, генерируемого лазером, которая и подается на свариваемое изделие в виде короткого импульса.

Значительная мощность энергии, развиваемая при очень коротких импульсах обычно приводит к бурному испарению металлов из зоны сварки. Поэтому в кван

товых генераторах предусматривается регулировка длительности импульса. Изменяя продолжительность импульса, можно получить менее резкий подъем температуры в месте сварки. В принципиальной схеме квантового генератора имеется устройство, позволяющее изменять продолжительность импульса и формировать его путем включения различных комбинаций емкостей в блоке накопления энергии.

Для осуществления сварки необходимо, чтобы импульсы имели максимальную длительность при минимальных интервалах между ними. Однако вследствие низкого КПД квантовых генераторов на рубине большая часть энергии лампы накачки превращается в тепло, вследствие чего эти лампы не могут работать при высокой частоте повторения импульсов, а рубиновый стержень перегревается.

Для уменьшения перерывов между импульсами необходимо интенсивно отводить значительное количество тепла, выделяемого при оптической накачке лазера. Частота повторения импульсов и мощность квантового генератора таким образом ограничиваются охлаждающими системами, отводящими тепло, возникающее в квантовых генераторах.

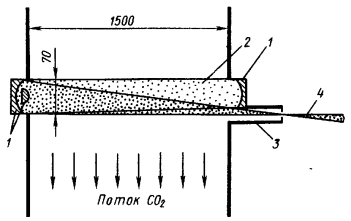


Рис. 90. Оптическая система лазера непрерывного действия

1 — зеркала; *2* — активная зона; *3* — аэродинамическое окно; *4* — выходящий луч

Существующие сварочные оптические квантовые генераторы дают возможность получить частоту повторения импульсов от 1 до 100 в минуту. Диаметр площади проплавления, получающейся в результате действия одного импульса луча лазера, составляет десятые доли миллиметра. Поэтому существующие оптические квантовые генераторы пока не могут быть использованы для сварки швов и используются лишь при сварке соединений типа точечной сварки.

Отличительной особенностью сварки оптическим лучом является возможность получения плотности энергии того же порядка, что и при использовании электронного луча. При этом способе сварки вследствие отсутствия пространственного заряда упрощается фокусировка луча. Сварку металлов можно производить на воздухе, в защитной атмосфере и в вакууме. Возможность точной дозировки энергии делает этот способ особенно пригодным при сварке микросоединений. Малая длительность термического цикла сварки обеспечивает возможность получения качественного соединения ряда металлов, особо чувствительных к длительному воздействию тепла. Открываются и новые возможности сварки металлов, например сварка через прозрачные оболочки.

Перспективной областью применения лазерной сварки является сварка микросоединений. Широкое применение лазерная сварка находит в радиоэлектронике и электронной технике при сварке контактов проводников с пленками на микроплатах, твердых схемах и микроэлементах.

Лазерным лучом можно сваривать самые различные композиции металлов, используемых в микроэлектронике: золото—кремний, германий—золото, никель—тантал, медь—алюминий и др.

Возможность получения мощных лазерных лучей открывает перспективу их использования для технологических целей.

Луч газового лазера непрерывного действия характеризуется малым поглощением в газах, простотой фокусировки и транспортировки энергии при помощи зеркал в труднодоступные места, однако защита сварочной ванны производится инертным газом. Исходный луч имеет форму кольца, который фокусируется с помощью оптической системы, показанной на рис. 90.

Использование лазеров непрерывного действия на CO_2 дает возможность получать сварные соединения стали толщиной до 15 мм. В перспективе имеется возможность увеличения толщины свариваемых изделий и использования их для термообработки и резки металлов. На рис. 91 представлена схема лазерной двухпозиционной установки для сварки и термической обработки изделий.

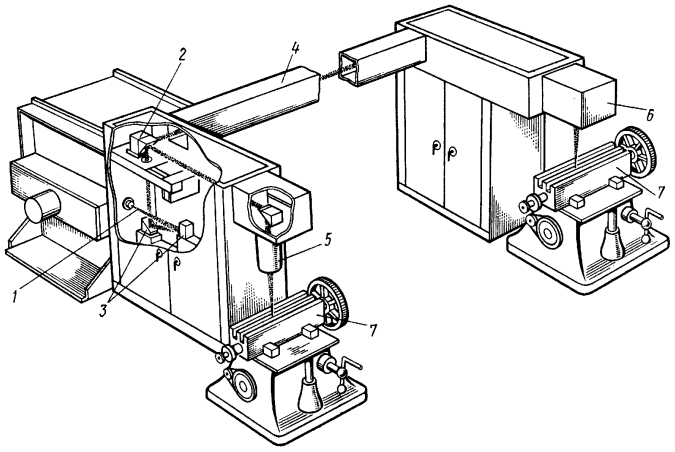


Рис. 91. Схема мощной лазерной установки, разработанной для сварки и термообработки:

1 — выход луча из газового квантового генератора; *2* — поворотное зеркало; *3* — зеркала; *4* — лучепровод; *5* — система фокусировки для сварки; *6* — система фокусировки для термообработки; *7* — рабочие столы с изделиями

Сварка и пайка энергией лучей оптического диапазона. Большой интерес вызывает применение для сварки и пайки сфокусированной лучистой энергии различных источников, излучающих в оптическом диапазоне частот.

Нагрев лучистой энергией обладает некоторыми преимуществами по сравнению с другими способами, а именно возможность термической обработки материалов независимо от их электрических и магнитных свойств; бесконтактным подводом энергии к изделию (причем источник и нагреваемый объект могут располагаться на значительном расстоянии друг от друга); незначительным механическим воздействием на зону нагрева; возможностью передачи энергии через оптически прозрачные оболочки, что позволяет проводить процессы сварки и пайки в контролируемой газовой атмосфере и в вакууме.

В установках для сварки и пайки световым лучом можно использовать такие источники излучения, как Солнце, угольная дуга, дуговые газоразрядные лампы и лампы накаливания.

Работы, проведенные в МАТИ, показали, что наиболее перспективным и удобным излучателем для технологических целей являются дуговые неоновые лампы сверхвысокого давления.

Отечественная промышленность серийно выпускает дуговые неоновые лампы следующих типов: с воздушным охлаждением ДКСШ-500 (0,5 кВт), ДКСШ-100М (1 кВт) и ДКСШ-3000 (3 кВт); с комбинированным водяным и воздушным охлаждением ДКСР-300 (3 кВт), ДКСР-5000 (5 КВт) и ДКСР-10000 (10 кВт).

Дуговая неоновая лампа представляет собой шаровой баллон из оптически прозрачного кварца с помещенными в него двумя вольфрамовыми электродами. Давление неона в лампе в нерабочем состоянии достигает 10 ат. Электропитание ламп осуществляется от источников постоянного тока с напряжением холостого хода не ниже 70 В и с падающей характеристикой (например, ИПП-500В). Лампы могут работать в непрерывном режиме сотни часов.

Создан ряд специализированных экспериментальных установок для сварки и пайки сфокусированной лучистой энергией неоновых ламп мощностью от 0,5—

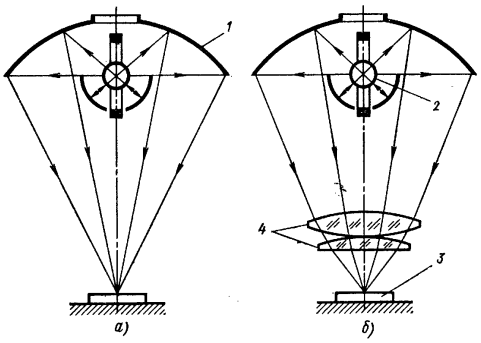


Рис. 92. Оптические схемы установок для сварки лучистой энергией:

а — моноэллипсоидная система; *б* — то же, с двухлинзовым конденсором; *1* — отражатель; *2* — лампа; *3* — изделие; *4* — конденсор

10 кВт. В этих установках излучение неоновой лампы фокусируется на изделие с помощью эллипсоидного отражателя. С целью увеличения плотности энергии в пятне нагрева используется дополнительная линзовая оптика (рис. 92, *а*, *б*).

Экспериментально установлено, что оптический источник тепла является нормально-круговым и по плотности энергии в пятне нагрева занимает промежуточное положение между газовым пламенем и электрической дугой, а по сосредоточенности близок поверхностным металлическим дугам.

В рабочем пятне установки УСПЭЛ-1-МАТИ с неоновой лампой ДКСР-10000 максимальная плотность лучистого потока составляет 2600 Вт/см². Лучистый поток такой плотности достаточен для плавления молибдена. КПД установок составляет 0,1—0,2 в зависимости от оптической системы и типа лампы.

Ввиду сравнительно низкой эффективной мощности оптический источник тепла целесообразно использовать для сварки материалов малых толщин.

Исследования по сварке нержавеющей стали и титановых сплавов показали возможность получения качественных соединений на листовом материале толщиной 0,1—2 мм. При этом обеспечивается вакуумная плотность и прочность не ниже 90% от прочности основного материала. Скорость сварки листов толщиной 0,5 мм составляет 10—15 м/ч.

Широкие пределы регулирования энергетических параметров позволяют использовать оптический источник для пайки практически любыми из существующих припоев, начиная от оловянно-свинцовых и кончая тугоплавкими на основе никеля и титана.

Оптический источник позволяет сваривать также и неметаллические материалы (стекло, керамику, пластмассу). Успешно осуществлен процесс сварки шлакового стекла, применение которого имеет большое народнохозяйственное значение.

Оптический источник тепла можно использовать также для локальной термической обработки сварных соединений.

ПЛАЗМЕННАЯ СВАРКА

Плазмой принято считать частично или полностью ионизированный газ, состоящий из нейтральных атомов и молекул, ионов и электронов. Типичное плазменное состояние вещества имеет место в электрическом газовом разряде. Газоразрядная плазма высокого давления (> 1 кгс/см²) обладает свойством локального термического равновесия, т. е. в небольшой области вблизи рассматриваемой точки соблюдается равенство температур электронов, ионов и нейтральных частиц.

В отличие от «горячей» термоядерной плазмы, характеризующейся температурой в десятки миллионов градусов, плазма газового рязряда в зависимости от

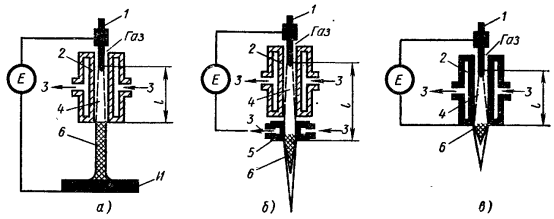


Рис. 93. Принципиальные схемы дуговых плазменных горелок для получения:

а — плазменной дуги (совмещенное сопло и канал; плазменная струя совпадает со столбом дуги); *б* — плазменной струи (раздельные сопло и канал; плазменная струя выделена из столба дуги); *в* — то же, совмещенные канал и сопло: *1* — электрод; *2* — канал; *3* — охлаждающая вода; *4* — столб дуги; *5* — сопло; *6* — плазменная струя; *Е* — источник тока; *И* — изделие; *l* — углубление электрода в канал

состава среды характеризуется температурами от 2000—3000° С (с добавками щелочных металлов) до 40 000—50 000° С (дуга, стабилизированная водяным вихрем). В дугах средней мощности (сила тока до 1000—1500 А), стабилизированных потоком газа (аргон, азот, кислород, водород), плазма обычно имеет температуру 5000—20 000° С.

Способы получения плазменных струй. Плазменные струи получают в специальных устройствах, которые в сварочной технике и примыкающих к ней процессах называют плазменными горелками.

В промышленной практике находят применение главным образом дуговые плазменные горелки постоянного тока.

Наиболее распространены способы получения плазменных струй путем интенсивного охлаждения газовым потоком столба дуги, горящей в сравнительно узком водоохлаждаемом канале плазменной горелки.

В инженерной практике наметились две схемы дуговых плазменных горелок.

1. Горелки для сварки плазменной дугой (горелки прямого действия), в которых одним из электродов является обрабатываемый материал (рис. 93, *а*). В этом случае используют два энергетических источника: плазменную струю и электрически активное пятно дуги. Внутренний коэффициент полезного действия такой горелки, т. е. использование подведенной к ней электрической энергии, достигает 60—80%.

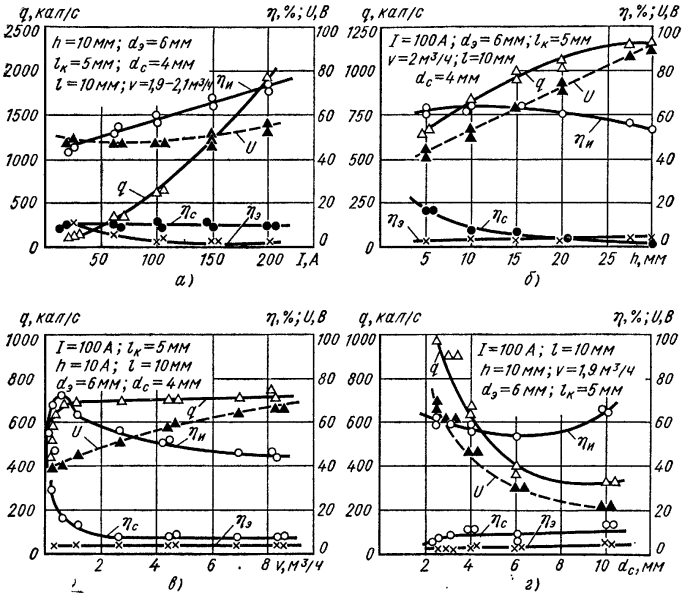


Рис. 94. Зависимость эффективной мощности q плазменной дуги, эффективного КПД $\eta_и$ плазменного нагрева изделия, относительной мощности, выделяющейся в сопле $\eta_с$ и электроде $\eta_э$, и напряжения дуги U (совмещенные каналы и сопло — см. рис. 93, *а*):

а — от силы тока дуги I; *б* — от расстояния h сопла до изделия; *в* — от расхода аргона v; *г* — от диаметра сопла $d_с$; $l_к$ — длина канала сопла; l — углубление электрода в канал; $d_э$ — диаметр вольфрамового электрода

2. Горелки для сварки плазменной струей (горелки косвенного действия) (рис. 93, *б*, *в*). Для снижения тепловой нагрузки на электроды применяют плазменные горелки с магнитным закручиванием дуги; максимальное значение внутреннего КПД таких горелок (при больших расходах газа) достигает 50—70%.

Состав плазмообразующего газа и материала электродов выбирают в зависимости от требований, предъявляемых к процессу. В качестве стабилизирующих газов применяют азот, аргон, водород, гелий, воздух и их смеси. Электроды изготовляют обычно из меди и вольфрама. Стенки камеры защищены от теплового воздействия дуги слоем сравнительно холодного газа.

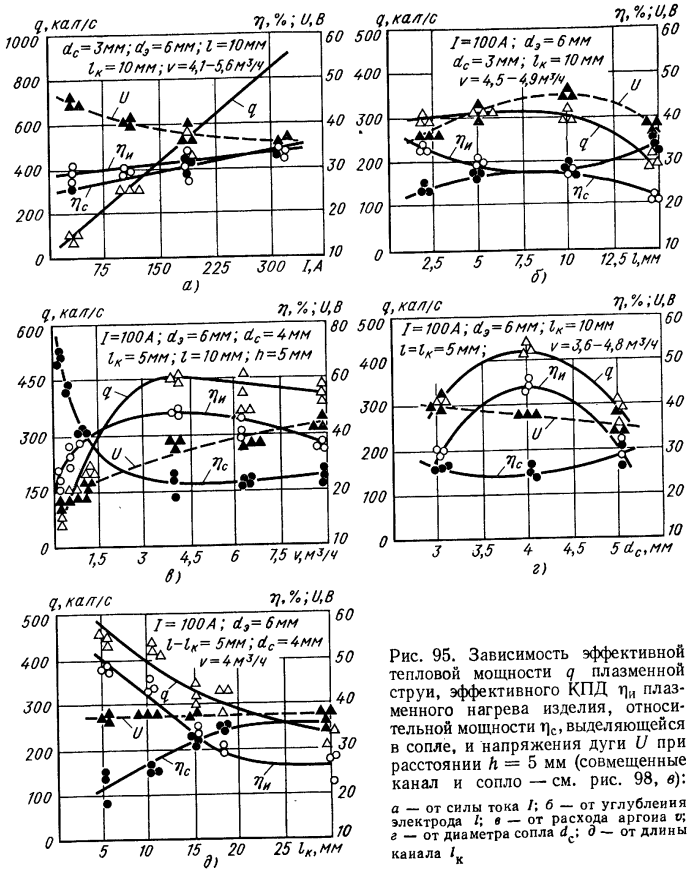


Рис. 95. Зависимость эффективной тепловой мощности q плазменной струи, эффективного КПД $\eta_и$ плазменного нагрева изделия, относительной мощности $\eta_с$, выделяющейся в сопле, и напряжения дуги U при расстоянии $h = 5$ мм (совмещенные канал и сопло — см. рис. 98, *в*):

а — от силы тока I; *б* — от углубления электрода l; *в* — от расхода аргона v; *г* — от диаметра сопла $d_с$; *д* — от длины канала $l_к$

Подводимая к дуговому разряду электрическая мощность не полностью преобразуется в плазменной горелке в потенциальную и кинетическую энергию плазменной струи. Часть энергии дуги расходуется на нагрев электродов разряда, а также рассеивается в окружающее пространство вследствие лучистого и конвективного теплообмена.

Интенсивность теплообмена дуги с отдельными элементами плазменной горелки в значительной мере определяют такие параметры плазменной струи, как мощность, температура, энтальпия и скорость, а также геометрические размеры канала и сопла горелки. Наиболее существенное влияние на мощность, расходуемую на нагрев электродов, оказывают ток и длина дуги, а также расход газа. В стержневом электроде (катод) выделяется примерно до 10%, а кольцевом (сопло — анод) — 15—50% мощности дуги.

Распределение энергии дуги (в %) между нагреваемым изделием $\eta_и$, соплом $\eta_с$, каналом $\eta_к$ и электродом $\eta_э$ плазменной горелки, а также эффективной мощности плазменной струи q и напряжения дуги U от основных параметров режима работы приведено на рис. 94 и 95.

Характеристики плазменных струй. Ярко светящееся ядро плазменной струи с основанием, несколько меньшим размера выходного отверстия сопла, окружено

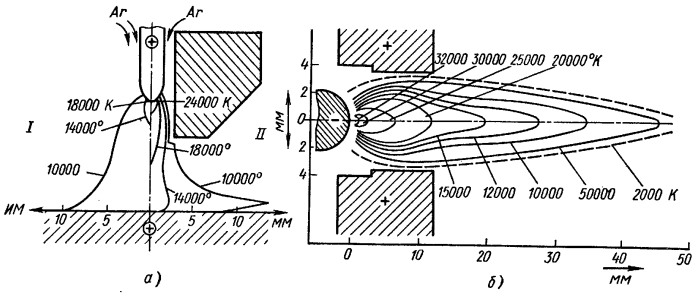


Рис. 96. Распределение температуры:

а — в плазменной дуге (*I* — дуговой разряд без стабилизации газовым потоком при аргонодуговой сварке; сила тока 200 А; напряжение дуги 14,5 В; *II* — дуговой разряд, горящий в канале плазменной горелки в потоке аргона между торированным вольфрамовым электродом и медной пластиной; диаметр канала 4,9 мм, расход аргона 1,08 м³/ч, сила тока 200 А, напряжение дуги 29 В); *б* — в плазменной струе

менее светящимся факелом. Длина струи определяется в основном мощностью дуги, размерами сопла, родом и расходом газа. При ламинарном истечении газа (низкие скорости струи) наблюдается длинная, мало смешивающаяся с окружающей атмосферой струя плазмы.

Короткая струя плазмы наблюдается при турбулентном истечении газа (большие скорости струи). Формой сопла можно задавать очертание плазменной струи и тем самым распределение теплового и силового воздействия по поверхности обрабатываемого тела.

Температура плазменной дуги и плазменной струи по радиусу и длине распределяется крайне неравномерно (рис. 96). Максимальная температура наблюдается в центре струи. В токоведущей части плазменной струи вблизи катода температура газа достигает 24 000—32 000° С.

В инженерной практике плазменную струю обычно характеризуют среднемассовой температурой на срезе сопла плазменной горелки, которая может быть определена по удельной энтальпии H плазмообразующего газа (рис. 97):

$$H=\frac{q}{G}, \tag{30}$$

где q — эффективная мощность плазменной струи на срезе сопла, кал/с; G — массовый расход плазмообразующего газа, г/с.

16. Основные параметры плазменной струи

Плазмообразующий газ	Мощность дуги, кВт	Расход газа, г/с	Внутренний КПД горелки, %	Удельная энтальпия газа, ккал/м³	Среднемассовая температура плазмы, К
Азот	25	0,5	60	9000	7 350
Водород		0,1	80	4315	4 075
Воздух		0,5	50	7760	6 925
Аргон			40	8540	14 100

Основные параметры плазменной струи при работе на газах, чаще всего используемых в процессах плазменной обработки материалов, приведены в табл. 16.

Среднемассовая температура $T_г$ плазменной струи ниже осевой температуры струи T_m. Отношение осевой температуры аргоновой струи к среднемассовой

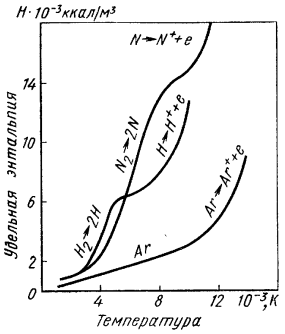


Рис. 97. Зависимость удельной энтальпии газов от температуры при атмосферном давлении

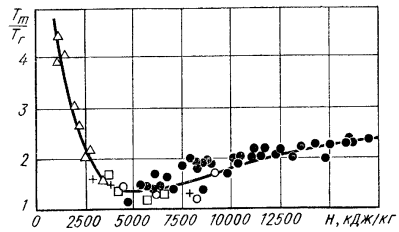


Рис. 98. Изменение отношения осевой T_m и среднемассовой $T_г$ температур в зависимости от удельной энтальпии H плазменной струи аргона (I = 100 А; длина дуги l = 25 мм; расход аргона G = 0,25 г/с; диаметр сопла $d_с = d_к$ = 8 мм; расстояние сопла до изделия h = 10 мм)

$T_m/T_г$ изменяется в пределах 1,1—1,4 (рис. 98). Для аргоновой струи это отношение можно в первом приближении представить как функцию удельной энтальпии плазменной струи.

Среднемассовая температура $T_г$ и мощность $q_г$ плазменной струи на срезе сопла, а также внутренний КПД $\eta_г$ плазменной горелки могут быть оценены расчетом, исходя из модели стержня, нагретого равномерно внутренним источником с отводом тепла от боковой поверхности:

$$T_г=\frac{0{,}24EI}{\pi d_с\alpha_к}\left[1-\exp\left(\frac{\pi d_с\alpha_к l}{c_p G}\right)\right]; \tag{31}$$

$$q=c_p G T; \tag{32}$$

$$\eta_г=\frac{q_г}{(EI+U_{ак})}, \tag{33}$$

где I — сила тока дуги; E — градиент напряжения столба дуги, В/см; $d_с$ — диаметр сопла, см; $\alpha_к$ — коэффициент теплоотдачи, кал/см²·с·°С; l — длина дуги, см;

$c_р$ — теплоемкость газа, кал/г·°С; G — расход газа, г/с; $U_{ак}$ — сумма анодного и катодного падения напряжений дуги, В.

Влияние основных параметров режима работы плазменной горелки на среднемассовую температуру $T_г$ и мощность $q_г$ плазменной струи на срезе сопла приведено на рис. 99.

Основными параметрами регулирования тепловых характеристик плазменной струи являются сила тока и длина дуги и расход плазмообразующего газа. Увеличение силы тока и длины дуги приводит к возрастанию температуры и удель-

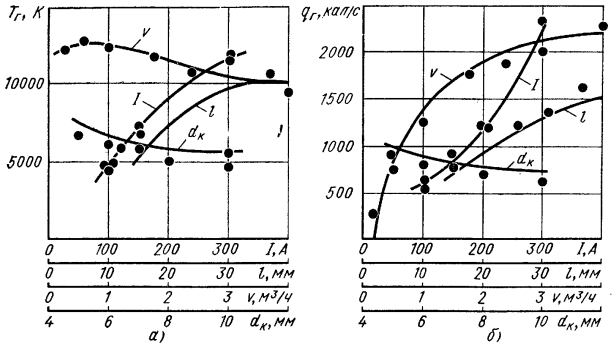


Рис. 99. Влияние основных параметров режима плазменной горелки — силы тока дуги I (l = 30 мм; v = 2,35 м³/ч; $d_к$ = 8 мм; $d_с$ = 6 мм), длины дуги l (I = 200 А; v = 2,35 м³/ч; $d_к$ = 8 мм; $d_с$ = 6 мм), расхода аргона v (I = 200 А; l = 30 мм; $d_к$ = $d_с$ = 5 мм), диаметра сопла канала $d_к$ (I = 100 А; l = 30 мм; v = 2,4 м³/ч; $d_к$ = $d_с$) на:

а — среднемассовую температуру $T_г$ плазменной струи аргона на срезе сопла; *б* — тепловую мощность струи аргона на срезе сопла плазменной горелки

ной энтальпии струи; повышение расхода плазмообразующего газа при больших его значениях снижает среднемассовые параметры — температуру и удельную энтальпию.

Важными характеристиками плазменной струи как источника теплоты при обработке материалов являются эффективная тепловая мощность, т. е. мощность, вводимая плазменной струей в обрабатываемое тело, и распределение этой мощности по пятну нагрева.

Эффективная мощность q струи меньше мощности $q_г$ плазменной струи на срезе сопла вследствие конвективных и лучистых потерь. Увеличение силы тока дуги, длины ее в дуговой камере и уменьшение диаметра канала сопла приводят к повышению тепловой эффективной мощности струи. Увеличение расхода газа при малых его значениях приводит к резкому увеличению мощности струи. При больших расходах газа эффективная мощность изменяется незначительно. Увеличение расстояния между соплом и нагреваемой поверхностью снижает эффективную мощность струи вследствие возрастания потерь энергии струи в основном в результате конвективного теплообмена струи с окружающей средой. Конвективные потери возрастают при турбулентном истечении струи из сопла. Этим объясняется более резкое снижение эффективной мощности струи при повышении расхода

газа, чему способствует также снижение температуры струи по мере удаления из сопла.

При воздействии плазменной струи на перпендикулярную к ее оси плоскую поверхность тела плотность теплового потока распределяется по закону, близкому к закону нормального распределения (рис. 100). Максимальную плотность теплового потока плазменной струи можно практически изменять от значений,

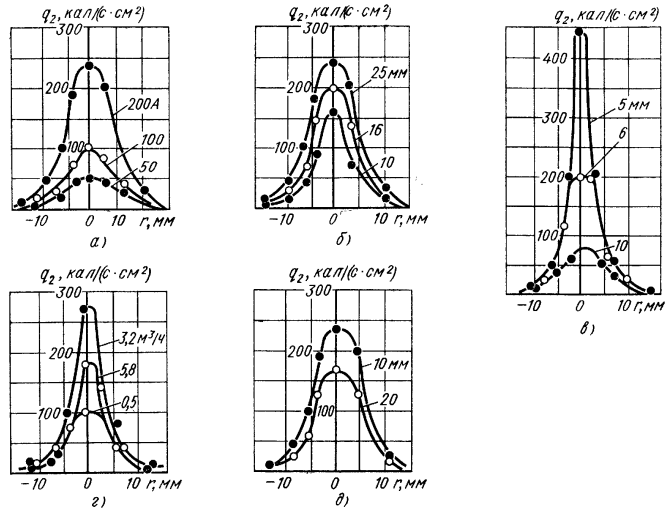


Рис. 100. Распределение плотности теплового потока q_2 по пятну нагрева плазменной струи в зависимости от:

а — силы тока дуги I (расход аргона v = 0,5 м³/ч; углубление дуги в канал l = 25 мм; диаметр канала $d_к$ = 8 мм; расстояние сопла от изделия h = 10 мм); *б* — углубления l дуги в канал (v = 0,5 м³/ч; I = 200 А; $d_к$ = 8 мм; h = 10 мм); *в* — диаметра канала $d_к$ (I = 100 А; v = 0,5 м³/ч; l = 25 мм; h = 10 мм); *г* — расхода аргона v (I = 100 А; l = 25 мм; $d_к$ = 8 мм; h = 10 мм); *д* — расстояния h между соплом и изделием (I = 200 А; v = 0,5 м³/ч; l = 25 мм; $d_к$ = 8 мм)

соответствующих потоку газового пламени, до значений, соответствующих сварочной дуге. Она возрастает с увеличением тока и длины дуги и уменьшением диаметра сопла. Увеличение расхода газа вначале повышает максимальную плотность теплового потока, а затем несколько снижает ее.

Плазменная струя оказывает заметное силовое воздействие на обрабатываемый материал. Влияние основных параметров работы плазменной горелки на давление в центре струи и полное «давление» (силовое воздействие), оказываемое струей на пластину, показано на рис. 101.

Сварка плазменной дугой находит применение при изготовлении изделий из нержавеющей стали, титана, никелевых сплавов, молибдена, вольфрама и многих других металлов и сплавов в авиационной и электронной промышленности,

судостроении, в нефтехимическом машиностроении и ряде других отраслей техники.

По сравнению с аргонодуговой сваркой плазменно-дуговая сварка отличается более стабильным горением дуги. При плазменной сварке обеспечивается более равномерное проплавление кромок.

Наиболее распространен способ сварки плазменной дугой, при котором дуговой разряд возбуждается между неплавящимся электродом плазменной горелки и свариваемым изделием (рис. 102).

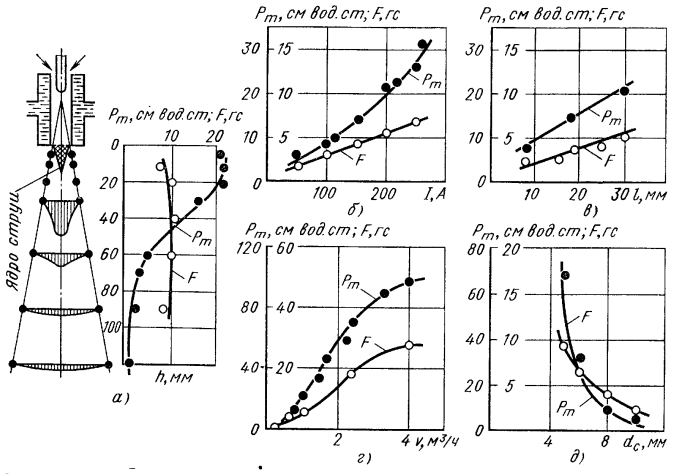


Рис. 101. Влияние параметров режима работы плазменной горелки на давление плазменной струи аргона в центре струи p_m и на полное давление (силовое воздействие) струи F (ток $I = 100 \div 200$ А; расход аргона $v = 0{,}5$ г/с; $l = 30$ мм; $d_c = d_к = 8$ мм; $h = 5$ мм):

а — расстояния h до горелки; *б* — силы тока I дуги; *в* — длины l дуги; *г* — расхода v газа; *д* — диаметра сопла d_c

Плазменная дуга, используемая для сварки металла, по проплавляющей способности занимает промежуточное положение между электронным лучом и сварочной дугой, горящей в аргоне. Столб дуги и струя плазмы имеют цилиндрическую форму, поэтому величина поверхности металла, через которую осуществляется теплопередача от струи к металлу, не зависит от расстояния между электродом горелки и свариваемым изделием.

Благодаря цилиндрической форме столба дуги процесс плазменно-дуговой сварки менее чувствителен к изменению длины дуги, чем процесс аргонодуговой сварки. Изменение длины дуги конической формы (при аргонодуговой сварке) всегда ведет к изменению диаметра пятна нагрева, а следовательно, и к изменению ширины шва. Плазменная дуга позволяет иметь практически постоянный диаметр пятна и дает возможность стабилизировать проплавление основного металла. Это свойство плазменной дуги с успехом используется при сварке очень тонких листов

Пятну нагрева при сварке плазменной дугой может быть придана наиболее благоприятная форма. Изменения формы пятна нагрева достигают применением специальных сопл (рис. 103). Если необходимо иметь пятно нагрева вытянутой формы, то в сопле делают два дополнительных отверстия (рис. 103, *б*). Через эти

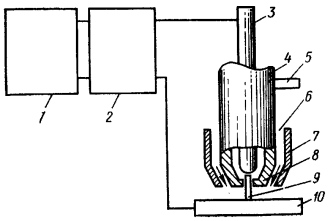


Рис. 102. Схема сварки плазменной дугой:

1 — сварочный источник питания; *2* — высокочастотный генератор; *3* — вольфрамовый электрод; *4* — плазмообразующий газ; *5* — охлаждающая вода; *6* — защитный газ; *7* — сопло для защитного газа; *8* — сопло, формирующее дугу; *9* — дуга; *10* — изделие

отверстия поступает холодный плазмообразующий газ, что приводит к уменьшению поперечного размера пятна нагрева и придает ему вытянутую форму. При сварке таким соплом зона термического влияния сужается, а скорость сварки возрастает на 50—100%.

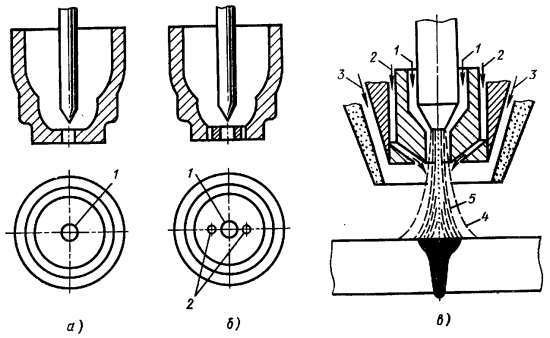


Рис. 103. Схемы плазмообразующих сопл для сварки плазменной дугой:

а — с круглым пятном нагрева; *б* — с вытянутым пятном нагрева (*1* — центральный канал для газа, обеспечивающий образование плазменной дуги; *2* — боковые отверстия для прохода холодного фокусирующего газа); *в* — с дополнительным газовым потоком для фокусировки дуги (*1* — плазмообразующий газ; *2* — фокусирующий газ; *3* — защитный газ; *4* — очертания дуги при отсутствии фокусирующего газа; *5* — то же, с фокусирующим газом)

Другая разновидность сопла с дополнительными отверстиями для создания фокусирующего газового потока приведена на рис. 103, *в*. Плазмообразующий газ *1* подается тангенциально, что позволяет при небольшом его расходе хорошо стабилизировать дугу. Поток фокусирующего газа направлен под углом к оси столба дуги и благодаря этому создает дополнительное сжатие ее.

Деформировать пятно плазменной дуги возможно путем наложения на нее неоднородного магнитного поля, создаваемого двумя парами магнитных полюсов. При помещении дуги в середину такой магнитной системы дуга вытягивается в одном направлении, превращаясь в линейный источник теплоты.

Сварка плазменной дугой характеризуется глубоким проплавлением основного металла в форме «замочной скважины».

Расход плазмообразующего газа устанавливают таким, чтобы истечение плазмы из сопла не было турбулентным, а силовое воздействие плазменной струи на поверхность сварочной ванны не приводило к разбрызгиванию расплавленного металла.

В качестве плазмообразующего газа обычно применяют аргон или его смеси с водородом или гелием, а для защиты металла сварочной ванны от окисления при сварке легированной стали, меди, никеля и сплавов на его основе — смесь аргона с 5—8% водорода. При сварке циркония и титана водород вообще нельзя применять ввиду большого сродства его к этим металлам. При укладке второго валика при двухслойной сварке или подварке корня шва рекомендуется применять гелий. При сварке низкоуглеродистой и низколегированной стали в качестве защитного газа можно применять углекислый газ.

Состав плазмообразующего газа влияет на глубину проплавления при данной силе тока. Добавление к аргону небольшого количества водорода увеличивает проплавление. Оптимальное содержание водорода 7%. Глубина проплавления при использовании гелия меньше, чем при применении аргона или аргоно-водородной смеси.

При сварке коррозионно-стойкой стали плазменной дугой добавка к аргону 7,5% водорода не вызывает пористости шва, которая при аргонодуговой сварке возникает при значительно меньшем содержании водорода в аргоне. Это явление, по-видимому, объясняется различными тепловыми условиями при кристаллизации металла в том и другом случае.

Плазменной дугой сваривают листы толщиной до 9,5 мм встык без разделки кромок и присадочного металла. В ряде случаев успешно сваривают за один проход листы толщиной до 12,7 мм. При сварке листов толщиной до 25 мм требуется V- или U-образная подготовка кромок, причем глубина и угол разделки значительно меньше, чем для аргонодуговой сварки. При плазменно-дуговой сварке количество присадочного металла снижается примерно в 3 раза. Наибольшие преимущества сварка плазменной дугой дает при соединении толстых листов без разделки кромок и без присадочного металла.

При сварке кольцевых швов, например при сварке труб, процесс сварки в начале и конце шва целесообразно производить с программным изменением параметров режима. Благодаря программированию параметров режима сварки можно успешно заварить замок шва, который получается ровным, без заметных шероховатостей и подрезов.

Присадочный металл вводят в плазменную струю в конце сварочной ванны.

При многопроходной плазменно-дуговой сварке толстых листов наложение последующих швов не должно сопровождаться проплавлением типа «замочная скважина». Поэтому при укладке последующих слоев силовое действие плазменной струи регулируют изменением расхода плазмообразующего газа так, чтобы расплавленный металл не вытеснялся из сварочной ванны.

При сварке плазменной дугой с проплавлением типа «замочная скважина» металл в шве удерживается за счет сил поверхностного натяжения. Однако для предохранения металла шва от окисления с нижней стороны его также рекомендуется защищать инертным газом. Для этого применяют подкладки с канавкой (как и при аргонодуговой сварке).

При сварке со сквозным проплавлением типа «замочная скважина» изменение расстояния сопла плазменной горелки до свариваемых листов в пределах ±1,6 мм не влияет на очертание и форму проплавления шва. Сравнительно узкая зона проплавления при плазменной сварке требует, чтобы отклонение оси плазменной горелки от оси шва не превышало 1,3 мм.

Плазменно-дуговая сварка может быть выполнена практически в любом пространственном положении. Режимы сварки плазменной дугой некоторых металлов и сплавов приведены в табл. 17.

17. Режимы сварки плазменной дугой стыковых соединений без присадочного металла

Металл	Толщина листов, мм	Скорость сварки, м/мин	Диаметр сопла, мм	Параметры дуги: Сила тока, А	Параметры дуги: Напряжение, В	Плазмообразующий газ: Состав	Плазмообразующий газ: Расход, м³/ч	Фокусирующий и защитный газ: Состав	Фокусирующий и защитный газ: Расход, м³/ч
Коррозионно-стойкая сталь	2,4	0,97	—	160	31	Ar + 7,5% H_2	0,14	Ar + 7,5% H_2	0,99
	3,2	0,61		145	32		0,28		
	4,8	0,41		240	38		0,34		1,27
	6,4	0,36					0,5		1,41
	12,7	0,190	2,4	305	35		0,14		1,4
Титан	3,2	0,51	—	185	21	Ar	0,23	Ar	0,85
	4,8	0,38		190	26		0,34		1,27
	12,7	0,254	2,4	285	38		0,113		0,85
Инконель 600	3,5	0,40		180	27		0,34		1,13
Низкоуглеродистая сталь	6,4	0,254	2,4	305	35		0,057		1,4
Алюминий *1				85	27	He + Ar	0,085 + 0,028		0,85

* Сварку выполняли на обратной полярности; остальные металлы сваривали на прямой полярности.

Большие преимущества плазменная дуга имеет при сварке труб, где ее применение обеспечивает резкое повышение производительности. Так, например, замена аргонодуговой сварки труб из нержавеющей стали с толщиной стенки 2,3 и 7 мм сваркой плазменной дугой позволяет увеличить скорость сварки на 50—200%.

При сварке труб с толщиной стенок до 3,8 мм содержание водорода в смеси с аргоном рекомендуется повышать до 15%. Сварку труб с большей толщиной стенок следует вести при меньшем содержании водорода (5—7%). Режимы сварки продольных стыков труб из нержавеющей стали приведены в табл. 18.

Сварка микроплазменной дугой. Микроплазменной дугой (сила тока 0,1—10 А) сваривают листы толщиной 0,025—0,8 мм из углеродистой и нержавеющей стали, меди, инконеля, хастеллоя, ковара, титана, тантала, молибдена, вольфрама и других металлов и сплавов.

Микроплазменная дуга находит широкое применение в радиоэлектронике и приборостроении для сварки тонких листов и фольги. По сравнению с аргонодуговой сваркой изменение длины микроплазменной дуги оказывает значительно меньшее влияние на качество сварного соединения. Исходя из допустимого 20%-ного изменения поперечного сечения пятна нагрева при сварке, длина плазменной дуги может колебаться в пределах ±1,27 мм, в то время как длина дуги при обычной дуговой сварке в аргоне ограничивается при тех же условиях ±0,127 мм.

18. Режимы плазменной сварки продольных стыков труб из коррозионно-стойкой стали

Толщина стенки, мм	Скорость сварки, см/мин	Сила тока (постоянный прямой полярности), А	Расход газа, м³/ч	
			плазмообразующего	защитного
2,8	92	115	0,28 *1	0,85 *1
3,2		210		1,13 *1
3,8				1,27 *2
5,5	38	200	0,34 *2	
6,0	36	270	0,43 *2	

*1 Аргон + 15% водорода.
*2 Аргон + 7,5% водорода.

Вольт-амперные характеристики плазменной дуги показывают, насколько велики возможности механизации процесса сварки. Высокие градиенты потенциала в столбе такой дуги (0,79—7,9 В/мм в зависимости от тока и состава газа) позволяют получать большое отклонение напряжения при незначительном изменении длины дуги (до 10 В при отклонении длины дуги ±1,27 мм). Это обстоятельство весьма важно для автоматического поддержания длины дуги при механизированной сварке. Кроме того, при сварке плазменной дугой возможно резкое изменение направления сварки при высокой скорости, например на 45° при скорости 75 см/мин. Типичные режимы сварки листов встык некоторых материалов приведены в табл. 19. Небольшие добавки водорода в защитный аргон улучшают теплопередачу от дуги к изделию. Гелиево-аргоновые смеси рекомендуется применять для сварки титана и других активных металлов, чтобы исключить их загрязнение. Хорошие результаты дает микроплазма при сварке угловых соединений (табл. 20). При необходимости сварку ведут с присадочным металлом.

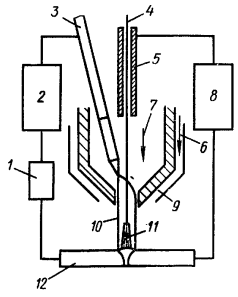


Рис. 104. Схема комбинированного способа — плазменно-дуговой сварки плавящимся электродом:

1 — источник тока с падающей внешней характеристикой; *2* — осциллятор; *3* — вольфрамовый электрод; *4* — электродная проволока; *5* — токоподвод; *6* — защитный газ; *7* — плазмообразующий газ; *8* — источник тока с жесткой внешней характеристикой; *9* — медное сопло; *10* — плазменная дуга; *11* — сварочная дуга; *12* — свариваемое изделие

Плазменно-дуговая сварка плавящимся электродом. Этот способ представляет собой сочетание сварки плазменной дугой и сварки плавящимся электродом в среде инертного газа (рис. 104)

Электродную проволоку подают по оси плазменной дуги, а вольфрамовый электрод, расположенный в дуговой камере плазменной горелки, наклонен под некоторым углом к оси горелки. В некоторых конструкциях плазменных горелок вольфрамовый электрод отсутствует, и его заменяет внутреннее сопло. Плавящийся электрод питается от отдельного источника тока с жесткой внешней характеристикой.

Производительность расплавления электродной проволоки, которая зависит от ряда параметров процесса сварки (силы тока, диаметра проволоки, полярности тока, диаметра сопла и др.), может достигать 30 кг/ч (табл. 21).

19. Режимы микроплазменной сварки листов встык (плазмообразующий газ — аргон: расход 17 л/ч; диаметр сопла 0,76 мм)

Толщина листов, мм	Ток, А	Защитный газ		Скорость сварки, см/мин
		Расход, л/ч	Состав	
Коррозионно-стойкая сталь				
0,79	10	710	Ar	7,6
0,76		425	0,5%H_2+Ar	12,7
0,25	6	566		20,2
	5,6	510	3%H_2+Ar	38,1
0,12	2	566	0,5%H_2+Ar	12,7
	1,6		50%H_2+Ar	33
0,08*1			0,5%H_2+Ar	15,2
0,02*1	0,3			12,7
Титан				
0,56	12	566	75%He+Ar	22,9
0,38	5,8			14
0,20	5		50%He+Ar	12,7
0,02*1	3			15,2
Инконель				
0,41	3,5	566	1%H_2+Ar	15,2
0,30	6		75%He+Ar	38,1
Хастеллой				
0,51	10	566	Ar	25,4
0,25	5,8			20,3
0,12	4,8			25,5
Медь				
0,08*1	10	566	75%He+Ar	15,2

*1 С отбортовкой кромок.

20. Режимы сварки угловых соединений микроплазмой (расход плазмообразующего аргона 17 л/ч; диаметр сопла 0,76 мм)

Толщина листов, мм	Ток, А	Защитный газ		Скорость сварки, см/мин
		Расход, л/ч	Состав	
Коррозионно-стойкая сталь				
0,24	4	650	0,5%H_2+Ar	12,7
0,18	3,2	566	4%H_2+Ar	78,8
0,13	2	425	Ar	12,7
	1,6		0,5%H_2+Ar	38,1
0,02	0,3	650	1%H_2+Ar	12,7

Продолжение табл. 20

Толщина листов, мм	Ток, А	Защитный газ: Расход, л/ч	Защитный газ: Состав	Скорость сварки, см/мин
		Титан		
0,20	3	566	Ar	12,7
0,08	1,6		Ar	12,7
	1,8		75%He+Ar	71
		Холоднокатаная сталь		
0,08	3	566	Ar	25,4
		Хастеллой		
0,51	6,5	566	Ar	17,8
0,25	3		Ar	7,6
0,20	2		Ar	5,1
0,13	1,5		1%H_2+Ar	25,4
0,10	0,2		4%H_2+Ar	15,2
		Ковар		
0,28	9	566	15%H_2+Ar	254

21. Производительность расплавления электродной проволоки

Параметры дуги: плазменной (вольфрамовый электрод — изделие): Сила тока, А	Напряжение, В	сварочной (проволока — изделие): Сила тока, А	Напряжение, В	Электродная проволока: Материал	Диаметр, мм	Полярность тока	Производительность плавления проволоки, кг/ч
170	25				0,5		0,66
134	41	0			1,2		1,68
264	46			Низкоуглеродистая сталь	1,6		4,62
230	42	220	35		1,2	Прямая	11,4
350	49	470	38	Низколегированная сталь	1,6		23,4
126	41	0	—				1,26
105	45	225	30	Низкоуглеродистая сталь			5,40
92	48	300	37				13,2*¹
125	39	250	35	Коррозионно-стойкая сталь	1,2	Обратная	7,2
100	52	470	47				29,4*¹
85	33	115	21	Алюминий			1,68
105	43	390	36				21,0*¹

*¹ При вращении дуги.

Этот комбинированный способ сварки обеспечивает возможность получения проплавления различной формы, вплоть до узкого, присущего сварке плазменной дугой.

При сварке на обратной полярности обоих электродов при большом токе на плавящемся электроде наблюдается вращение дуги, в результате чего образуется широкий шов с неглубоким проплавлением. Погонная энергия сварки регулируется изменением тока в плазменной дуге: вольфрамовый электрод — изделие.

Режимы сварки листов из алюминиевого сплава комбинированным способом приведены в табл. 22.

22. Режимы сварки алюминиевого сплава AlMgSi проволокой того же состава

Толщина листов	Диаметр проволоки	Расстояние сопла до изделия	Параметры плазменной дуги: Сила тока, А	Параметры плазменной дуги: Напряжение, В	Параметры сварочной дуги: Сила тока, А	Параметры сварочной дуги: Напряжение, В	Расход газа, л/мин: плазмообразующего аргона	Расход газа, л/мин: защитного (67 Ar — 33 He)	Скорость: подачи проволоки, м/мин	Скорость: сварки, м/ч
мм										
15	1,6	16	200	30	240—280	23,5	10,5	40	11	24
25			240	32	280—320	24,5			16	18

Сварка плазменной струей. Применение плазменной струи, выделенной из столба дуги (дуга горит между вольфрамовым электродом и соплом горелки), для сварки металлов ограничено. Опыты показали, что при сварке плазменной струей тепловая энергия, вводимая струей в свариваемое изделие, мала. Расход газа при сварке должен быть небольшим, так как в противном случае расплавленный металл выдувается из зоны соединения. При малых расходах газа 60—70% энергии дуги идет на нагрев сопла плазменной головки и лишь 20—30% энергии дуги вводится в свариваемое изделие. Вследствие этого скорость сварки невелика.

СВАРКА И РЕЗКА ПОД ВОДОЙ

Подводная сварка. Способ дуговой сварки под водой основан на способности дуги устойчиво гореть в газовом пузыре при интенсивном охлаждении окружающей водой (рис. 105). Газовый пузырь образуется за счет испарения и разложения воды, паров и газов расплавленного металла и обмазки электрода.

Вокруг горящей дуги выделяется большое количество газов, что приводит к повышению давления в газовом пузыре и частичному выделению газов в виде пузырьков на поверхности воды. Вода разлагается в дуге на свободный водород и кислород; последний соединяется с металлом, образуя окислы. Взвешенные в воде продукты сгорания металла и обмазки, состоящие преимущественно из окислов железа, образуют облако взвесей, которое затрудняет наблюдение за дугой.

Устойчивое горение дуги под водой можно объяснить принципом минимума энергии Штеенбека, т. е. усиленное охлаждение какого-либо участка дуги компенсируется увеличением количества выделяемой энергии на нем. Для компенсации тепловых потерь из-за охлаждающего действия воды и наличия большого количества водорода напряжение на дуге под водой требуется более высокое (30—35 В).

Сварку под водой выполняют на постоянном и переменном токе. На постоянном токе дуга горит более устойчиво, чем на переменном, так как постоянный ток

разлагает воду еще до возбуждения дуги, а переменный ток разлагает воду и образует газовый пузырь в момент короткого замыкания под действием высокой температуры.

С увеличением глубины и давления окружающей среды устойчивость дуги не нарушается; возрастает только напряжение и увеличивается ток.

Подводная сварка возможна в пресной речной и соленой морской воде. В качестве источников питания используют однопостовые и многопостовые сварочные агрегаты, сварочные преобразователи и трансформаторы, имеющие напряжение холостого хода 70—110 В.

Для ручной дуговой сварки под водой используют электроды диаметром 4—6 мм (рис. 106, *а*) из сварочной проволоки марок Св-08, Св-08А, Св-08ГА,

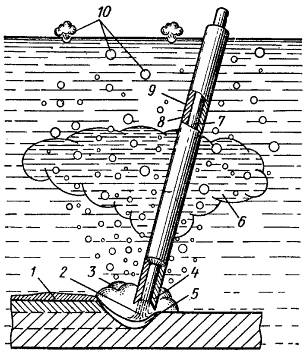


Рис. 105. Принципиальная схема горения дуги под водой:

1 — шлак; *2* — дуга; *3* — газовый пузырь; *4* — козырек; *5* — сварочная ванна; *6* — облако мути; *7* — металлический стержень; *8* — обмазка; *9* — водонепроницаемое покрытие; *10* — пузырьки газа

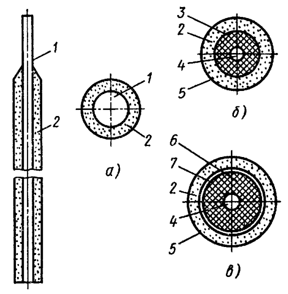


Рис. 106. Электроды для подводной сварки и резки:

а — плавящийся электрод для сварки; *б* — трубчатый электрод для резки; *в* — карборундовый электрод для резки; *1* — металлический стержень; *2* — покрытие; *3* — стальная трубка; *4* — канал для кислорода; *5* — водонепроницаемое покрытие; *6* — карборундовый стержень; *7* — металлическая оболочка

Св-10Г2, а для полуавтоматической сварки — проволоки марок Св-08Г2С, ППС-АН1. Состав электродных покрытий, обеспечивающих устойчивое горение дуги под водой, приведен в табл. 23. Наибольшее применение получили электроды марок ЭПС-5 и ЭПС-52, имеющие в составе покрытий ферросплавы, что улучшает химический состав и механические свойства металла шва. Водонепроницаемость покрытия достигается пропиткой такими составами, как парафин, раствор целлулоида в ацетоне, раствор синтетических смол в дихлорэтане, нитролаки и др. Пропитка производится трех-четырехкратным погружением покрытых электродов в соответствующий раствор с последующей просушкой при комнатной температуре после каждого погружения.

Для подводной сварки применяют специальные электрододержатели, которые имеют надежную электроизоляцию по всей поверхности.

Смена электрода производится только после отключения сварочного тока. Сварочная цепь имеет прямой и обратный кабели.

При сварке под водой выполняют соединения внахлестку, тавровые, угловые, реже стыковые, причем чаще всего способом опирающегося электрода. Горение

23. Состав электродных покрытий для подводной сварки и резки металла

Марка электрода	Состав сухой смеси, %																				
	Железный сурик	Двуокись титана	Полевой шпат	Плавиковый шпат	Ферромарганец	Ферротитан	Ферросилиций	Мрамор	Титановый концентрат	Железная руда	Цирконовая руда	Крахмал или декстрин	Порошковое железо	Красная кровяная соль	Поташ	Древесная мука	Кварцевый песок	Мел	Бертолетова соль	Портландцемент	Жидкое стекло
Для неответственных работ во всех пространственных положениях *1																					
ЭП-35	85	—	—	—	—	—	—	10	48	—	—	—	—	5	—	—	—	—	—	—	30
ЛПС-3	—	—	48	—	—	—	—	—	48	—	—	—	—	4	—	—	—	—	—	—	30
Для сварки углеродистых и низколегированных сталей во всех пространственных положениях *2																					
ЭПС-5	—	35	10	—	5	12	3	10	—	—	5	—	—	—	10	—	—	—	—	—	20
Для сварки углеродистой и низколегированной стали методом опирания в нижнем и вертикальном положениях *1																					
ЭПС-52	—	3	29	—	30	5	—	—	—	28	—	5		—	—	—	—	—	—	—	20–25
ЭПО-55	—	25	—	—	8	12	5	20	—	—	—	—	30	—	—	—	—	—	—	—	20—26
УОНИ-13/45П	—	—	—	18	2	15	3	53	—	—	—	—	—	—	—	—	9	—	—	—	30
Для сварки низколегированной стали типа СХЛ и марганцовистых *1																					
М-5	—	—	—	26	7	—	10	51	—	—	—	—	—	—	—	—	6	—	—	—	30
Для резки *2																					
ЭПР-1	—	—	18	—	—	—	17	12	—	—	—	—	—	—	10	17	—	—	—	—	36
ПРТ *1	—	—	40	—	—	—	22	30	—	—	—	—	—	—	—	8	—	—	—	—	35
ЛПС-2 *1	57	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	37	4	2	30
Р-2 *1	40	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5	—	—	—	50	5	—	30

*1 Жидкое стекло к весу сухой смеси.
*2 Жидкое стекло входит в процентное содержание смеси. Поташ к весу сухой смеси.

дуги отличается в этом случае высокой стабильностью. Сварщик перемещает дугу без колебаний поперек шва с сохранением постоянного угла наклона электрода. Способом опирающегося электрода можно сваривать швы во всех пространственных положениях. Сварку в вертикальном положении производят сверху вниз, при этом электрод наклонен в сторону ведения сварки.

Силу тока при подводной сварке опирающимся электродом в нижнем положении устанавливают выше, чем при сварке в обычных условиях (табл. 24). При сварке в вертикальном положении сила тока снижается на 10%, а в потолочном положении — на 15%.

24. Режимы подводной сварки

Марка электрода	Диаметр электрода, мм	Сила тока, А	Род тока, полярность	Коэффициент наплавки, г/А · ч
ЭП-35	4—5	220—240	Постоянный, прямая	6,0—6,5
УОНИ-13/45П	4	200—220	Постоянный, прямая и обратная	6,3—7,0
ЭПС-5	4	160—220		
	5	250—270		9,2—9,8
ЭПО-55	4	240—260	Постоянный, прямая и обратная; переменный	6,7—9,7
	5	200—275		
ЭПС-52	4	160—200	Постоянный, прямая, переменный	5,3—7,9
	5	200—250		

Техника выполнения водолазом-сварщиком сварных соединений под водой более сложна, чем на воздухе. Это связано с плохой видимостью в воде, стесненностью тяжелым и неудобным для движений водолазным снаряжением, необходимостью дополнительных затрат на преодоление течения, возможностью нарушения устойчивости сварщика на грунте, неприспособленностью человеческого организма к работе на больших глубинах. Поэтому в сварных соединениях часто наблюдаются дефекты: непровар одной из кромок, подрезы, наплывы, поры и т. п.

При сварке электродами в воде на глубинах до 50 м содержание водорода в металле шва повышается до 60—70 мл/100 г, содержание углерода падает с 0,26 до 0,09%, марганца с 0,63 до 0,12%, кремния с 0,16 до 0,03%. Металл шва имеет мелкозернистое строение; из-за высокой скорости охлаждения зона термического влияния меньше, чем при сварке на воздухе. В зависимости от марки электрода, используемого для сварки, прочность сварных соединений достаточно высока, а пластичность — мала: $\sigma_в = 35 \div 55$ кгс/мм²; $\delta = 3 \div 12\%$; $a_н = 4 \div 9$ кгс·м/см²; $\alpha = 30 \div 130°$. Под водой хорошо сваривается малоуглеродистая сталь, удовлетворительно — низколегированная сталь некоторых марок; плохо сваривается сталь, склонная к закалке.

В практике подводных сварочных работ наибольшее распространение получила наплавка, заварка трещин в корпусе, обварка головок заклепок, приварка заплат, судоподъемных проушин, ребер жесткости, сварка рулевых устройств, трубопроводов, различных подводных сооружений.

Для подводной сварки и резки разработаны и применяются полуавтоматы типа ППСР-300-2 , «Нептун». Полуавтоматом ППСР-300-2 (рис. 107) можно сваривать сталь толщиной 4 мм и более, резать сталь толщиной до 25 мм на глубине до 60 м. В качестве защиты используют углекислый газ. Полуавтомат рассчитан на номинальную силу тока 300 А. Скорость подачи сварочной проволоки диаметром 1,2 или 1,6 мм регулируется в пределах 6,6—21,6 см/с. При зарядке кассеты проволокой в количестве 4—5 кг сварщик может непрерывно работать 2—2,5 ч.

При полуавтоматической сварке дуга горит устойчиво, взвесей образуется мало, что почти не мешает наблюдению за дугой. Металл шва отличается низким

содержанием водорода и неметаллических включений. Высокая прочность и пластичность обеспечиваются благодаря мелкозернистой структуре и отсутствию дефектов и включений.

Использование порошковой проволоки марки ППС-АН1 при полуавтоматической сварке стали ВСт3 гарантирует равнопрочность металла шва основному

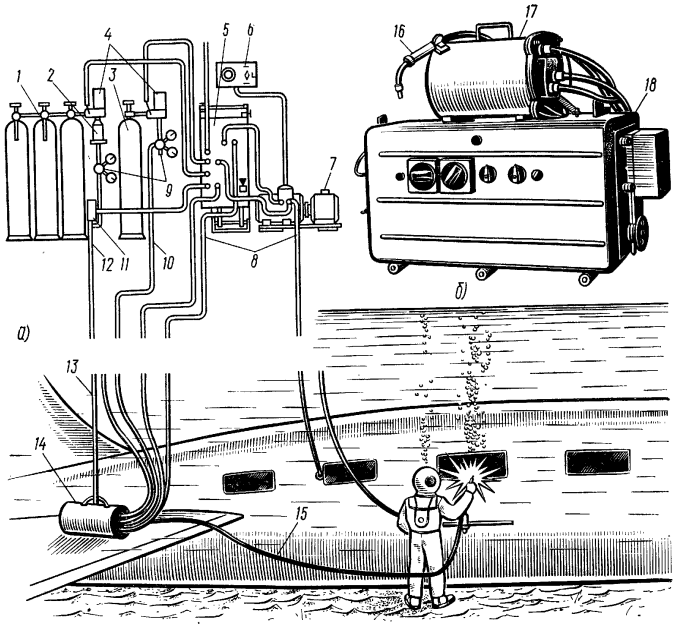


Рис. 107. Полуавтомат типа ППСР-300-2 для подводной сварки и резки:

а — схема полуавтомата; *б* — внешний вид полуавтомата; *1* — кислородные баллоны; *2* — осушитель кислорода; *3* — баллон с углекислым газом; *4* — подогреватели газа; *5* — шкаф управления; *6* — пульт дистанционного управления; *7* — сварочный агрегат; *8* — сварочные кабели; *9* — редукторы; *10* — шланг для подачи CO_2; *11* — электромагнитный кислородный клапан; *12* — шланг для подачи кислорода; *13* — трос для подвешивания бункера; *14* — бункер; *15* — специальный шланг-кабель; *16* — сварочная головка; *17* — механизм подачи проволоки; *18* — шкаф управления

металлу: $\sigma_в = 44$ кгс/мм²; $\sigma_т = 32{,}2$ кгс/мм²; $\delta = 32\%$; $a_н = 10{,}8$ кгс·м/см²; $\alpha = 180°$. Кроме высокого качества сварных соединений, полуавтоматическая сварка обеспечивает бо́льшую производительность, чем при ручной сварке. Поэтому полуавтоматическая сварка в ближайшие годы найдет широкое распространение в производстве сварочных работ под водой. Высокое качество сварных соединений получается при использовании в качестве защитного газа аргона, непрерывно подаваемого через трубчатую проволоку в зону дуги, или при сварке в защитных камерах. При сооружении подводных трубопроводов и проведении

ремонтных работ применяют кессоны, в которых сварку производят вручную электродами и на полуавтоматах.

При строительстве подводных трубопроводов большого диаметра применяют сварку взрывом. Сварные соединения, в основном при сварке внахлестку, обладают высокой прочностью.

Ведутся работы по применению автоматической сварки плавящимся электродом в среде аргона под высоким давлением (до 20—30 кгс/см²) и положено начало использования плазменной сварки.

Подводная резка. Резка металла под водой, так же как и сварка, сопряжена с трудностями и опасностью для работающих.

В подводных условиях применяют различные способы резки: механические, термические, кумулятивные (взрывом). Наибольшее распространение получили способы термической (огневой) резки, электродуговая, газокислородная, электрокислородная, плазменно-дуговая.

При подводной резке используется тепло концентрированных источников дуги или плазмы и тепло, выделяющееся от химического взаимодействия кислорода с металлом. Поскольку разрезаемый металл находится в воде и интенсивно охлаждается, то источники тепла должны иметь высокую концентрацию его в месте реза.

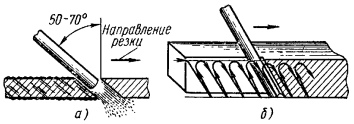


Рис. 108. Схемы электродуговой резки в нижнем положении:

а — металла небольшой толщины; *б* — металла большой толщины

Подводная электродуговая резка отличается от дуговой подводной сварки повышенными значениями сварочного тока и приемами выполнения работ. Поэтому дуговую резку под водой можно выполнять на том же оборудовании, что и подводную сварку. Целесообразно использование постоянного тока прямой полярности, так как это приводит к выделению большого количества тепла в полости реза.

Электроды для резки отличаются от электродов для сварки размерами, толщиной и составом обмазки. Электроды изготовляют из проволоки диаметром 5—7 мм, длиной 500—700 мм.

При выборе режимов тока для резки следует принимать коэффициент K равным 60—80 А/мм. Практикой подводных работ установлено, что электродами диаметром 5 мм можно успешно разрезать металл толщиной > 50 мм при силе тока 350—500 А.

Режимы резки, обеспечивающие максимальную производительность процесса, находят опытным путем.

Резка осуществляется непрерывным перемещением электрода. Она начинается с кромки или с отверстия и производится пилообразными движениями конца электрода. Металл небольшой толщины (до 10—15 мм) разрезается непрерывным перемещением конца электрода вдоль линии реза (рис. 108, *а*). При резке металла большой толщины (рис. 108, *б*) движение электрода от верхней поверхности к нижней осуществляется медленно, подъем его к верху — быстро.

Из табл. 25 видно, что с увеличением толщины металла производительность дуговой резки быстро падает, а расход электродов на 1 пог. м. реза растет. Поэтому способ дуговой резки рекомендуется применять для толщин не свыше 15—20 мм.

Способ электрокислородной резки удачно объединил преимущества дугового разряда и струи режущего кислорода. За счет тепла дуги происходит нагрев и плавление металла, а за счет струи кислорода — сгорание и выдувание металла из полости реза. В основном применяют трубчатые электроды с осевым каналом для режущего кислорода и специальные электроды из карборунда.

25. Производительность и расход электродов при резке

Толщина стали, мм	Производительность, м/ч	Расход электродов, шт/м	Толщина стали, мм	Пронзводительность, м/ч	Расход электродов, шт/м
5	1,3	3	30	0,3	80
10	0,8	7	40	0,22	120
15	0,6	15	50	0,17	150
20	0,4	40	60	0,14	200

Стержни электродов изготовляют из толстостенной цельнотянутой трубки из малоуглеродистой стали наружным диаметром 5—7 мм и внутренним 1,5—2 мм (см. рис. 106, *б*). Длина электродов 350—400 мм. Трубчатый электрод покрывают обмазкой толщиной 1—1,2 мм. Время сгорания такого электрода 1 мин.

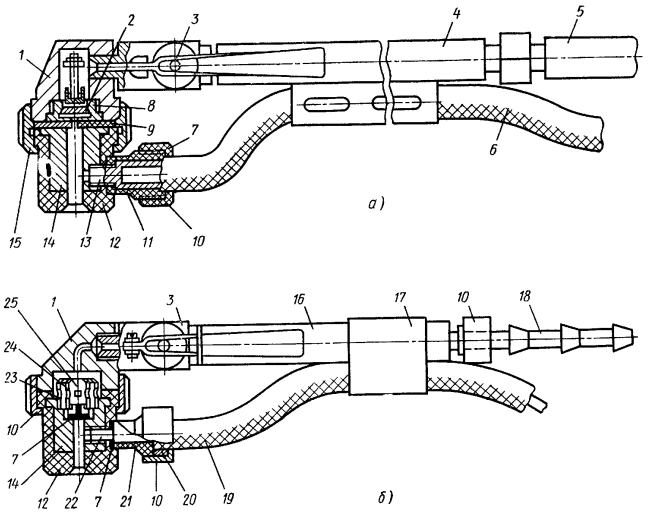


Рис. 109. Электрододержатели для электрокислородной резки:

а — тип ЭКД-4; *б* — тип ЭКД-4-60; *1* — корпус; *2* — клапан; *3* — кислородный клапан; *4* — рукоятка; *5* — шланг; *6* — токоведущий кабель; *7* — прокладки; *8* — предохранительный клапан; *9* — прокладка; *10* — гайка; *11* — втулка; *12* — мундштук; *13* — контакт; *14* — головка держателя; *15* — гайка; *16* — трубка; *17* — обойма; *18* — ниппель; *19* — кабель; *20* — шайба; *21* — втулка; *22* — контакт; *23* — прокладка; *24* — искрогасительная камера; *25* — колпачок

Электроды из карборунда получили название керамических (см. рис. 106, *в*). Керамический электрод из карборунда длиной 250 мм сгорает через 15 мин. Однако из-за больших размеров (диаметр 15—18 мм) керамические электроды могут быть рекомендованы для резки сплошного металла толщиной до 30 мм.

Для электрокислородной резки применяют электрододержатели специальной конструкции типа ЭКД4 и ЭКД4-60 (рис. 109, *а*, *б*).

Электрокислородную резку применяют для резки черных и цветных металлов толщиной до 100—120 мм на глубинах до 100 м. По производительности электрокислородная резка выше электродуговой и газокислородной резки (табл. 26).

26. Показатели электрокислородной резки

Толщина металла, мм	Сила тока, А	Давление кислорода, кгс/см²	Время резки 1 пог. м, мин	Расход электродов, шт/м
10	200	2	23	5
15	220	3	33	6
20	250	4,5	45	8
30	275	5,5	60	10
40	300	6	90	12
50	320	6,5	105	15
60	350	7	120	18
80	350	9	145	24
100	350	11	180	30

27. Эффективность воздушно-плазменной резки

Толщина металла, мм	Скорость резки, м/ч		
	электрокислородной	плазменно-дуговой	воздушно-плазменной
12	7,8	25,5	210
20	4,1	19,8	60
40	2,1	10	18

Примечание. Воздушно-плазменную резку производили в лабораторных условиях.

Дуговая резка на полуавтомате типа ППСР-300-2 осуществляется путем непрерывной подачи проволоки и концентрического обдувания ее струей кислорода, поступающего в режущую приставку головки полуавтомата (см. рис. 107).

Большая концентрация тепла и узкая струя кислорода обеспечивают резку металла толщиной 25 мм при силе тока 300 А и давлении кислорода 6 кгс/см² со скоростью до 4 м/ч. Разработан способ дуговой резки углеродистой и нержавеющей стали и алюминия толщиной до 45 мм, который основан на выплавлении металла дугой, горящей между порошковой проволокой и разрезаемым металлом, с одновременной подачей в полость реза интенсивной струи воды. Резка при этом способе производится постоянным током обратной полярности на режимах: сила тока 500—1000 А, напряжение 20—40 В; давление воды 5—10 кгс/см²; расход воды 6—12 л/мин; скорость резки до 14 м/ч.

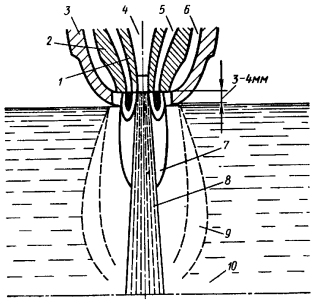


Рис. 110. Схема водородно-кислородной резки:

1, 2 — мундштуки; *3* — колпачок; *4* — режущий кислород; *5* — горючая смесь; *6* — воздух; *7* — подогревающее пламя; *8* — струя режущего кислорода; *9* — воздушный пузырь; *10* — вода

Для плазменно-дуговой резки разработана специализированная установка типа ОПРР-1, обеспечивающая резку в пресной и морской воде. Плазменную резку металла толщиной 8—40 мм на глубинах до 10 м производят при силе тока 200—600 А и напряжении дуги 120—140 В со скоростью 5—24 м/ч.

Применение плазмотронов с циркониевым катодом позволяет использовать сжатый воздух, который повышает тепловую мощность плазменной дуги и улучшает ее режущие способности. Присутствие кислорода в воздухе повышает эффективность резки стали Ст3С (табл. 27).

Газокислородная резка основана на сгорании металла в струе кислорода и выдувании окислов и металла из полости реза. Она возможна только при постоянном существовании газового пузыря вокруг подогревающего пламени (рис. 110). Создание газового пузыря возможно за счет продуктов сгорания подогревающего пламени, для которого используют ацетилен, водород, другие углеводороды и бензин. Устойчивость пузыря обеспечивается специальной конструкцией наконечника подводного резака и подачей защитного газа — воздуха или кислорода. В воде металл интенсивно охлаждается и поэтому для его подогрева требуется пламя в 10—15 раз большее, чем для аналогичных работ на воздухе.

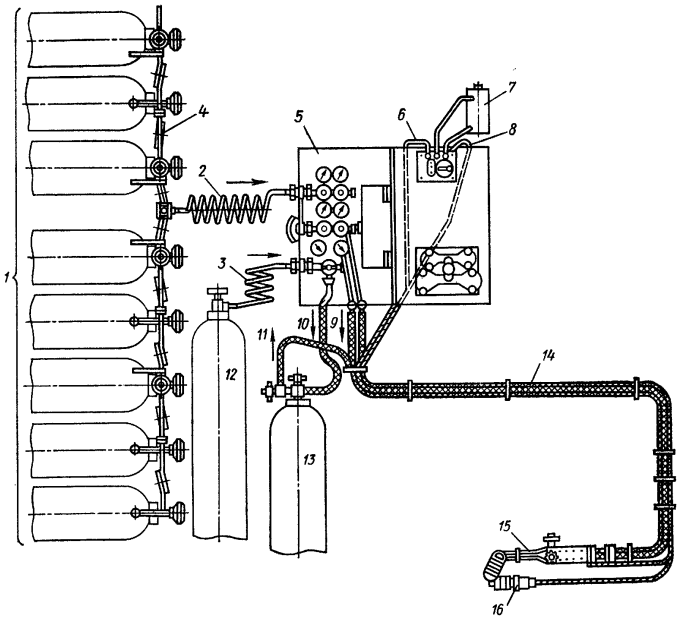


Рис. 111. Схема установки для подводной бензокислородной резки:

1 — баллоны с кислородом; *2* — змеевик для кислорода; *3* — змеевик для азота; *4* — кислородная рамка; *5* — пульт управления; *6* — к резаку; *7* — батарея аккумуляторов; *8* — к электрозажигалке; *9* — кислород подогретый; *10* — азот; *11* — бензин; *12* — баллон с азотом; *13* — баллои с бензином; *14* — шланг; *15* — резак; *16* — электрозажигалка

Наибольшее распространение получили водородно-кислородная и бензино-кислородная резка.

Подогревающее пламя образуется за счет водородно-кислородной смеси, подаваемой по кольцевому каналу между мундштуками *1* и *2* (рис. 110). Между наружным колпачком *3* и мундштуком *2* подается сжатый воздух для создания пузыря и предохранения пламени от соприкосновения с водой. Режущий кислород поступает по центральному каналу мундштука *4*.

Водород и кислород поступают в резак по шлангам из баллонов, а воздух по отдельному шлангу от компрессора или баллонов. На глубине 30—40 м водородно-кислородным резаком можно разрезать сталь толщиной до 70 мм; рабочее

давление газов составляет, кгс/см²: 6,6 — кислорода, 5,5 — водорода, 5 — воздуха. Средний часовой расход водорода и кислорода 4—10 м³, воздуха ~ 20 м³.

Использование бензина для подводных работ стало возможным благодаря разработке новых конструктивных принципов построения бензорезов, сущность которых состоит в том, что бензин предварительно не испаряется, а распыляется кислородом и в зону подогревательного пламени подается в виде тончайшей бензиновой пыли. Продукты сгорания пламени содержат много неконденсирующихся газов, образующих устойчивый газовый пузырь, что исключает подведение дополнительного воздуха или кислорода, упрощает и удешевляет установку и ее эксплуатацию.

Схема установки для питания резака бензином и кислородом показана на рис. 111. В комплект установки входит батарея из 6—12 баллонов кислорода, баллоны с бензином и азотом, батарея аккумуляторов, резак и электрозажигалка. На пульте управления для понижения давления установлены два кислородных редуктора и азотный редуктор. Бензин подается под давлением азота. Бензорез за 1 ч расходует 30—50 м³ кислорода, 10—20 кг бензина; расход азота незначителен. Скорость резки бензино-кислородным пламенем выше, чем водородно-кислородным, на 20—30%.

Во время сварки и резки под водой токоведущие части устройств находятся в постоянном контакте с водой, и всегда существует возможность утечки тока. Поэтому возникает вероятность поражения работающего током. При работе под водой требуется строгое соблюдение всех правил и рекомендаций водолазной службы, инструкций по технике безопасности при сварке и резке. Для подводной сварки и резки допускаются водолазы только в исправном снаряжении, обеспечивающем полную изоляцию от воды и тока, владеющие соответствующими навыками при выполнении указанных работ.

АТОМНО-ВОДОРОДНАЯ И ТЕРМИТНАЯ СВАРКА

Атомно-водородная сварка. Плавление металла происходит за счет тепла, выделяемого при превращении атомарного водорода в молекулярный водород, и за счет тепла независимой дуги, горящей между двумя вольфрамовыми электродами.

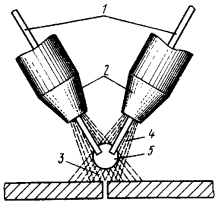


Рис. 112. Схема процесса атомно-водородной сварки:

1 — электроды; *2* — мундштуки горелки; *3* — зона превращения атомарного водорода в молекулярный; *4* — молекулярный водород, поступающий из мундштуков; *5* — зона диссоциации водорода на атомарный

Тепловой эффект от излучения дуги и от сгорания молекулярного водорода в наружной зоне пламени незначителен по сравнению с эффектом рекомбинации атомов водорода.

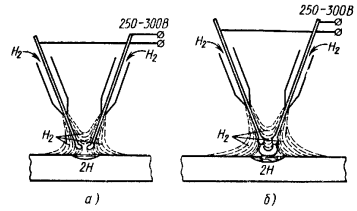
Температура атомно-водородного пламени составляет ~ 3700° С, что по концентрации тепла приближает этот способ сварки к сварке в среде защитных газов. Водород при этом способе сварки передает тепло от дуги к изделию вначале за счет поглощения его при реакции диссоциации, а затем путем выделения при рекомбинации атомов водорода. Высокая активность водорода обеспечивает хорошую защиту металла шва от вредного воздействия кислорода и азота воздуха.

При атомно-водородной сварке дуга горит между двумя вольфрамовыми электродами, расположенными под углом (рис. 112). В зону дуги можно подавать чистый водород или азотно-водородные смеси, получаемые при диссоциации аммиака. Питание дуги осуществляется от источников переменного тока. Из-за высокого охлаждающего действия реакции диссоциации водорода и высокого потенциала ионизации водорода напряжение источника питания дуги, требуемое для ее зажигания, должно быть 250—300 В. Напряжение горения дуги 60—120 В. Сила тока дуги 10—80 А.

Широкий диапазон изменения напряжения горения дуги мало сказывается на величине изменения силы тока. Напряжение горения дуги зависит от расхода водорода и расстояния между вольфрамовыми электродами.

Зажигание дуги осуществляется коротким замыканием вольфрамовых электродов, обдуваемых водородом, или, лучше, замыканием электродов на угольную (или графитовую) пластинку при обдувании струей газа, так как в этом случае обеспечивается легкое зажигание дуги и не требуется повышенного напряжения холостого хода источника питания. После зажигания дуги расстояние от концов электродов до поверхности изделия устанавливают в пределах 4—10 мм. Это зависит от мощности атомно-водородного пламени и толщины свариваемого металла.

Дуга может быть спокойной (рис. 113, *а*), когда нет в дуге характерного веера, и звенящей (рис. 113, *б*), когда веер пламени касается поверхности свариваемого изделия и дуга издает резкий звук. Для спокойной дуги напряжение не превышает 20—50 В и расход водорода 500—800 л/ч, для звенящей дуги — 60—120 В и 900—1800 л/ч соответственно.



а *б*

Рис. 113. Формы дуги:
а — спокойной; *б* — звенящей

При атомно-водородной сварке выполняют следующие виды сварных соединений: стыковые с отбортовкой и без отбортовки кромок, угловые, тавровые и нахлесточные. Высоту отбортовки принимают равной двойной толщине свариваемого листа. Угловые соединения выполняют с применением присадочной проволоки или без нее. При сварке толщин более 3 мм на стыковых и тавровых соединениях рекомендуется выполнять скос кромок под углом $\geqslant 45°$.

Обычно атомно-водородную сварку рекомендуется применять для сварки металлов и сплавов толщиной 0,5÷5—10 мм. Этим способом хорошо свариваются малоуглеродистая и легированная сталь, чугун, алюминиевые, магниевые сплавы. Хуже свариваются медь, латунь из-за склонности к насыщению водородом и испарению цинка. При сварке алюминия и сплавов на его основе необходимо применить флюсы, состоящие из солей щелочных металлов. Металлы с высокой химической активностью к водороду, например Ti, Zr, Ta и др., нецелесообразно сваривать атомно-водородной сваркой.

Атомно-водородная сварка обеспечивает получение сварных соединений со свойствами, близкими к свойствам основного металла.

Техника выполнения швов при атомно-водородной сварке подобна технике газовой сварки, т. е. может быть осуществлена как правым, так и левым методами.

Атомно-водородную сварку можно осуществлять в нижнем и вертикальном положениях, по режимам приведенным в табл. 28.

28. Режимы (ориентировочные) атомно-водородной сварки

Толщина листа, мм	Диаметр электрода, мм	Сила тока, А	Средний расход водорода, л/ч	Рабочее давление водорода, кгс/см²
До 1	2	30	1200	0,055
» 3		40	1400	0,064
» 5	3	50	1500	0,068
» 6—8		60	1600	0,073
» 8—10	4	70	1750	0,080
Св. 10		80	1850	0,085

Установка для атомно-водородной сварки (рис. 114) состоит из атомно-водородного аппарата, баллона с водородом, водородного редуктора, горелки и пускорегулирующей аппаратуры. При горении дуги в смеси водорода и азота в состав установки (рис. 115) входит еще баллон с аммиаком, крекер для получения азотно-водородной смеси из аммиака, аммиачный вентиль, водоотделитель и осушитель для газа. Водород с воздухом образует взрывные смеси, поэтому все соединения

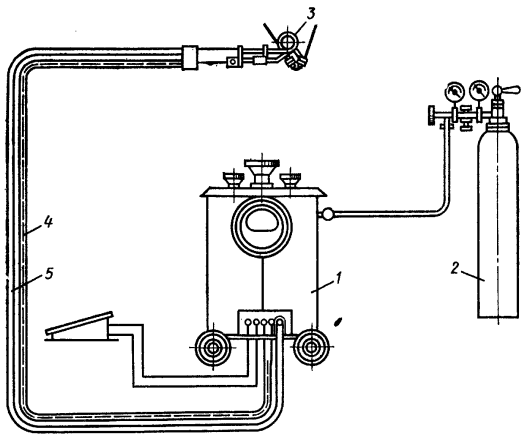


Рис. 114. Схема установки для атомно-водородной сварки:

1 — атомно-водородный аппарат; *2* — баллон с водородом; *3* — горелка; *4* — токоподвод; *5* — шланг для подачи водорода

трубопроводов, вентилей, шлангов должны быть надежными, а помещения, где производится работа, хорошо вентилируемые.

При соединении водорода с углеродом в условиях сварочной дуги происходит обезуглероживание металла. Поэтому в производственных условиях вместо чистого водорода применяют смеси водорода с азотом. Для расщепления аммиака на водород и азот используют аппараты-крекеры (см. рис. 115, *а*), в которых расщепление происходит при 600 °С в присутствии катализатора — железной стружки. Из крекера смесь газов поступает в очиститель (см. рис. 115, *б*) и далее в осушитель, где азотно-водородная смесь, пройдя слой хлористого кальция, поступает по резиновому шлангу в сварочную горелку.

29. Технические характеристики аппаратов для атомно-водородной сварки

Тип аппарата	Тип горелки	Номинальное напряжение, В	Пределы регулирования силы тока, А	Номинальная мощность, кВт
ГЭ-1-2	ГЭГ-2-2	220	30—83	18,3
ГЭ-2-2	ГЭГ-1-1	260	20—75	15,6
АВ-40	Г12-1	220	15—49	10,7
АГЭС-75	ГЭГ-1-1	300	20—100	22,5

Известны аппараты для атомно-водородной сварки типа ГЭ-1-2, ГЭ-2-2, АВ-40, АГЭС-75, техническая характеристика которых приведена в табл. 29.

Атомно-водородная сварка широко применялась в самолетостроении, химическом машиностроении и других отраслях промышленности. В настоящее время из-за значительного прогресса других способов сварки атомно-водородная сварка применяется редко.

Термитная сварка. Источником тепла являются порошкообразные смеси металлов с окислами других металлов — термиты, при сгорании которых происходит обменная реакция по кислороду с выделением значительного количества тепла (экзотермическая реакция). Источником кислорода в термите является

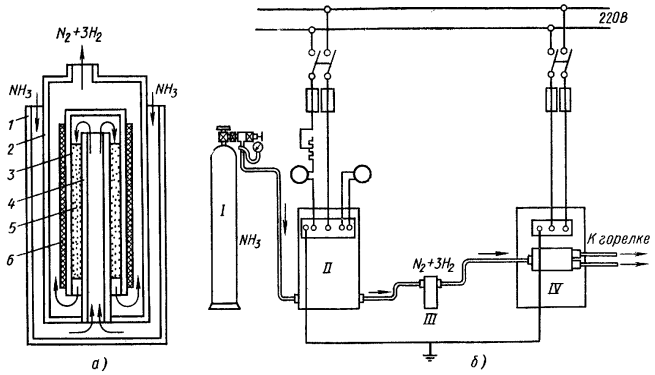


Рис. 115. Схемы крекера (*а*) и установки (*б*) для сварки азотно-водородной смесью:

1 — корпус; *2* — сосуд, питающий пост азотно-водородной смесью; *3* — нагреватель; *4* — труба с катализатором; *5* — катализатор; *6* — электродвигатель; *I* — баллон с аммиаком; *II* — крекер; *III* — водоотделитель; *IV* — азотно-водородный аппарат

окисел, а источником тепла (горючим) — металл, входящий в смесь в чистом виде. Необходимым условием для получения теплового эффекта является то, что количество тепла, выделяющегося при сгорании горючего, должно быть больше, чем требуется для разложения окисла. В качестве окислов в термитных смесях используют железную окалину, а в качестве горючих металлов — алюминий, магний. Кроме того, в термит можно вводить легирующие элементы для улучшения механических свойств термитного металла и металлический наполнитель — железную обсечку — для увеличения выхода жидких продуктов термитной реакции (стали).

Воспламенение термитной смеси происходит при температуре не ниже 1350° С. Для этих целей применяют термитные спички, которые имеют в головке магниевый термит, развивающий температуру при горении > 1500° С, и другие переходные составы на основе магниевых порошков, бертолетовой соли, перекиси бария, а также электрозапальные устройства.

Наибольшее распространение для сварки получили алюминиевые термиты, содержащие 20—25% алюминиевого порошка и 75—80% окалины. Физико-химические параметры термитного процесса приведены в табл. 30.

30. Физико-химические параметры термитного процесса

Окислитель	Содержание компонентов, %					Температура процесса, °С
	До реакции		Продукты реакции			
	Al	Окисел	Fe	Al_2O_3	Q, ккал/моль	
Fe_2O_3	25,24	74,76	52,28	47,72	179,5	2670
FeO	20	80	62,2	37,8	185,1	2260

Термохимические реакции при сгорании термита выражаются следующим образом:

$$2Al + Fe_2O_3 = Al_2O_3 + 2Fe + 179{,}5 \text{ ккал/моль};$$

$$2Al + 3FeO = Al_2O_3 + 3Fe + 185{,}1 \text{ ккал/моль}.$$

При сварке стремятся применять термит с наибольшим тепловым эффектом реакции. Это резко сокращает потребность в термите.

Получению максимального теплового эффекта способствуют следующие факторы: высокая химическая чистота компонентов термита; подготовка окислителя с содержанием кислорода, по химическому составу близкого к Fe_2O_3; правильный выбор соотношения основных компонентов — алюминиевого порошка и железной окалины и весового количества

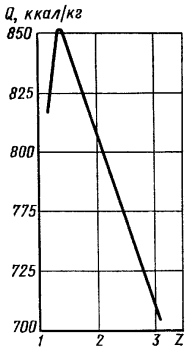


Рис. 116. Влияние коэффициента стехиометричности на тепловой эффект при термитной реакции

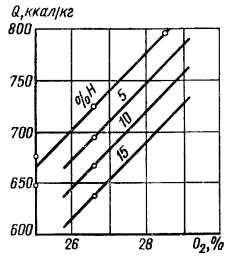


Рис. 117. Изменение теплового эффекта термитной реакции при введении металлического наполнителя

металлического наполнителя. Наличие в восстановителе примесей Cu, Si, Mg, Zn, а в окислителе Mn, Si, S, P, Cr и др. резко снижает тепловой эффект термитной реакции из-за протекания побочных реакций с меньшей теплотворной способностью. Повышение содержания кислорода в окалине достигается за счет ее обжига при 900° С в окислительной среде и за счет ее более тонкого измельчения. Наиболее благоприятными по содержанию кислорода являются частички железной окалины размерами 0,25—0,4 мм. Для получения соединения Al_2O_3 в процессе протекания реакций необходимо постоянное соотношение алюминиевого порошка и окисла, определяемое коэффициентом стехиометричности состава термита Z (рис. 116), который для сварочных процессов имеет значения $Z = 0{,}964 \div 1{,}020$.

Введение металлического наполнителя в количестве 10—15% массы основных компонентов термита (рис. 117) изменяет температуру процесса за счет потребления части тепла на плавление наполнителя. На параметры теплового процесса термитной реакции оказывают влияние также перемешивание и уплотнение компонентов термита (табл. 31).

31. Влияние характеристики термита на скорость и мощность реакции

Характеристика термита, состав	Скорость реакции, кг/с	Мощность реакции, ккал/с
Высококалорийный термит, неуплотненный: 99% Al; $Z = 1{,}01$; 28,5% O_2; 10% обсечки	0,33	262
Низкокалорийный термит, неуплотненный: 96% Al; $Z = 1{,}02$; 25% O_2; 10% обсечки	0,31	204
Низкокалорийный термит, прессованный при 400 кгс/см²: 99% Al; $Z = 1{,}02$; 25% O_2	0,16	106

Для изготовления сварочного термита используют алюминиевый порошок, содержащий 96,5—99,7% Al; 0,47% Fe; 0,36% Si и ~1% Al_2O_3. Железная окалина, используемая в термите, является сложным химическим соединением, состоящим из нескольких окислов: от окиси железа Fe_2O_3 плотностью 5,1 г/см³ и температурой плавления 1565° С до закиси железа FeO плотностью 5,7 г/см³ и температурой плавления 1420° С. Железная окалина является в основном продуктом отходов горячей обработки стали; она прочно удерживает влагу до 550—600° С.

Стальной наполнитель (гвоздевая обсечка) имеет насыпной вес 1,8—2,2 г/см³; кристаллизационная влага и органические включения устраняются прокаливанием при температуре >600° С. Плотность уплотненного (спрессованного) термита может достигать 3,2—3,4 г/см³. Термит воспламеняется при 1300—1360° С. Теплота реакции для стехиометрических составов термита 575—850 ккал/кг. Шлаковая составляющая термитного расплава имеет температуру кристаллизации >1950° С. Термитный металл в сварочной форме распределяется так, %: 72—80 на облив свариваемых деталей, 20—28 на литниково-выпорную систему. При термитном процессе возможно легирование металла, которое можно осуществлять через восстановитель, окислитель, металлический наполнитель, ферросплавы, легирующие окислы, введением легирующих элементов в чистом виде. Легирующие элементы, чаще всего в виде ферросплавов FeMn и FeSi, вводятся в термит обособленно в отдельных порциях или перемешиваются с шихтой.

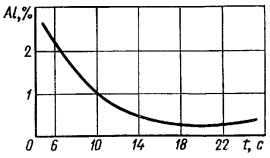


Рис. 118. Изменение содержания алюминия в термитном металле за время протекания термитного процесса

На рис. 118 приведено изменение содержания алюминия в термитном металле за время протекания термитного процесса 23 с. За время реакции происходит также изменение в химическом составе металла по содержанию углерода, кремния, марганца. Общим свойством термитного металла является присутствие в его составе алюминия. Пониженное количество алюминия означает присутствие

в термитном металле кислорода, который снижает механические свойства термитной стали. Содержание в стали до 0,25—0,40% Al не влияет на механические свойства термитного металла, а содержание Al свыше этих величин понижает его прочность.

Термитный металл, полученный при реакции основных компонентов термита, имеет химический состав, %: 0,1 C; 0,08 Mn; >0,09 Si; 0,03 S; 0,03 P; 0,09 Cu; 0,07 Al и невысокую прочность ($\sigma_в$ = 35 ÷ 40 кгс/мм², δ = 18 ÷ 20%). Поэтому при сварке стали необходимо подбирать по составу такой термитный металл, механические свойства которого не отличались бы от свойств свариваемой стали.

32. Содержание легирующих элементов в термите

Легирующие элементы	Содержание элементов в лигатуре, %			Содержание элементов от массы основных компонентов, %
	C	Mn	Si	
Ферромарганец:				
низкоуглеродистый	<2	80	2	3,2—4
высокоуглеродистый	2—8	70	3	0,65—0,75
Графит	95	—	—	0,3

При введении легирующих элементов в термит необходимо учитывать их переход в термитный металл; количество легирующих элементов определяется в процентном отношении от основных компонентов термита (табл. 32).

Потери элементов на угар составляют, %: 30 C; 20 Si; 80 Mn. Изменяя количество вводимых легирующих элементов, можно в широких пределах изменять химический состав и механические свойства термитного металла, так предел прочности можно изменять в пределах 40—75 кгс/мм².

Оптимальные значения измельчения компонентов, используемых в сварочном термите, составляют, мм: 0,1—1,0 алюминиевого порошка; 0,05—1,0 железной окалины; 1,0 стального наполнителя; 0,25—0,63 легирующих компонентов.

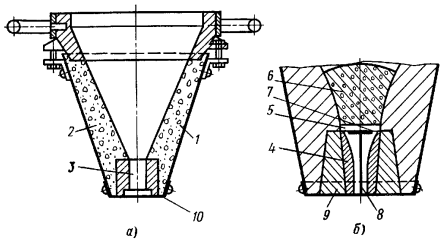


Рис. 119. Тигель для сжигания термита:

а — тигель; *б* — дно тигля; *1* — корпус; *2* — футеровка; *3* — стакан; *4* — втулка для выпуска расплава; *5* — магнезитовый песок; *6* — термит; *7* — асбестовый кружок; *8* — запорный гвоздь; *9* — стакан

Компоненты термита взвешивают с точностью ±0,2%, а наполнитель с точностью ±0,5%. Низкокалорийный термит развешивается на порции по 6 и 7,5 кг, высококалорийный — на порции 2,5—3,5 кг; 4—4,7 кг; 5,1—5,5 кг и 6,5 кг. Тигель для сжигания термита показан на рис. 119. В пакет с термитом укладывается запорное устройство (рис. 119, *б*). В зависимости от размеров свариваемого изделия вес термитной порции может меняться от нескольких сотен граммов до нескольких килограммов. Сгорание термита происходит в тигле (рис. 119, *а*). Тигель имеет корпус из листовой стали с внутренней магнезитовой футеровкой, огнеупорную втулку (штепсель) и крышку.

Для удержания жидкого металла в месте сварки применяют сварочные разъемные формы, которые могут быть сырые и сухие. Сырые формы изготовляют на месте работ и предварительно перед сваркой их просушивают. Для изготовления сырых

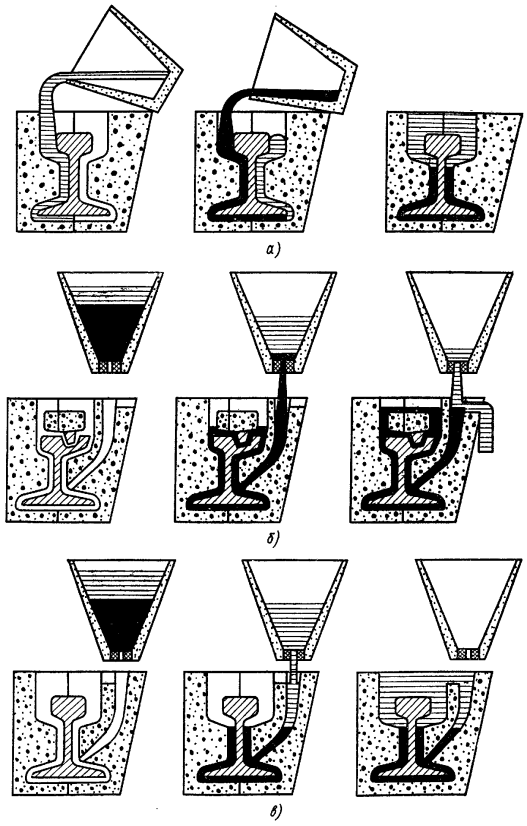


Рис. 120. Способы термитной сварки рельсов:

а — давлением; *б* — промежуточного литья; *в* — комбинированный

форм используют кварцевый песок (80—85%) и глину (15—20%). Сухие формы изготовляют из кварцевого песка (92—93%) и жидкого натриевого стекла (8—7%). Литниковую систему выполняют с учетом способа подготовки стыка под сварку, разъема сварочных форм, системы газа и шлакоудаления, зазора в стыке.

Существует несколько способов термитной сварки, которые отличаются технологией процесса и применяемым оборудованием (рис. 120). При использовании термитной сварки давлением торцы свариваемых деталей (рельсов) шлифуют и плотно прижимают один к другому, затем стык зачеканивают по всему периметру. На стык устанавливают формы (рис. 120, *а*) и через край тигля сливают вначале шлак, а затем термитный металл. Температура стыка в начале процесса равна температуре окружающей среды, поэтому жидкий шлак быстро теряет тепло и, застывая, покрывает стык коркой толщиной до 4 мм. Выливаемый затем термитный металл вытесняет оставшийся жидкий шлак в верхнюю часть формы. Затвердевшая ранее шлаковая корка не допускает приварки термитного металла к основному металлу, однако через нее перегретый термитный металл за 3—4 мин нагревает стык до 1400—1450° С. После нагрева производят осадку стыка сжимным прессом, затем сбивают формы и удаляют металлический облив. При этом способе сварки наблюдается значительный рост зерна, что требует применения последующей термической обработки. Механические свойства сварного соединения получаются низкими. Способ термитной сварки давлением для рельсов в настоящее время почти не применяют. Наиболее распространена сварка способом промежуточного литья (рис. 120, *б*). При этом способе торцы рельсов сближают и устанавливают с зазором 12—14 мм, стыку придают конструктивный изгиб на 1,5—2 мм и устанавливают две половинки сварочной формы. На головку рельса устанавливают вкладыш. Закрепленные формы и вкладыши промазывают огнеупорной глиной. В отверстие наружной половинки формы вставляют горелку для предварительного нагрева концов рельсов до 850—900° С. Время нагрева составляет 15—30 мин в зависимости от мощности горелки и типа рельсов.

Термитный металл, расплавленный в тигле за 18—20 с, после выдержки 4—6 с выпускают в форму. Расплавленный перегретый металл оплавляет основной металл у стыка и образует с ним сварное соединение. Через 10—15 мин после выпуска металла формы можно снять. Этот способ также не лишен недостатков: повышенный расход термита, образование литой структуры с дефектами и значительный облив сечения стыка термитным металлом.

При комбинированном способе (рис. 120, *в*) головки рельсов со вставленной между ними пластиной из малоуглеродистой стали сваривают способом давления, а шейку и подошву рельсов, между которыми имеется зазор, сваривают способом промежуточного литья.

При качественном выполнении технологических операций этим способом сварки прочность стыка может достигать 80 кгс/мм². Этот способ сварки можно применять при строительстве новых линий и капитальном ремонте, но вследствие громоздкости оснастки и сложности технологии он требует тщательного подхода.

В электромонтажном производстве применяют термитно-тигельную и термитно-муфельную сварку (рис. 121).

Термитно-тигельная сварка (рис. 121, *а*) может быть использована для соединения стальных стержней и полос при выполнении заземляющих устройств в местах, где отсутствует электроэнергия, например при строительстве высоковольтных линий. Разработаны оборудование и технология для сварки стержней диаметром 12—16 мм и полос сечением 40 × 4 мм.

Термитно-муфельную сварку применяют для соединения проводов линий связи и электропередачи. При этом используют магниевый термит (25% магния и 75% окиси-закиси железа), который прессуют со связующим веществом в цилиндрические муфели (рис. 121, *б*, *в*, *г*).

Сварку проводов линий связи диаметром до 6 мм производят с использованием полых цилиндрических муфелей. Концы стальных проводов, введенные в муфель, при горении термита разогреваются, частично оплавляются и свариваются при сдавливании специальными клещами (см. рис. 121, *б*). Для соединения неизолированных сталеалюминиевых и медных проводов воздушных электролиний используют способ термитно-муфельной сварки, когда концы проводов расплавляют в формочке, заключенной в муфель, и затем сдавливают при помощи специального приспособления (см. рис. 121, *в*). Термитно-муфельную сварку кабелей и изолированных проводов с алюминиевыми жилами производят без давления с введением присадочного металла в формочку через специальное отверстие (см. рис. 121, *г*). Разновидностью последнего способа является сварка по торцам двух или нескольких алюминиевых изолированных проводов (см. рис. 121, *д*).

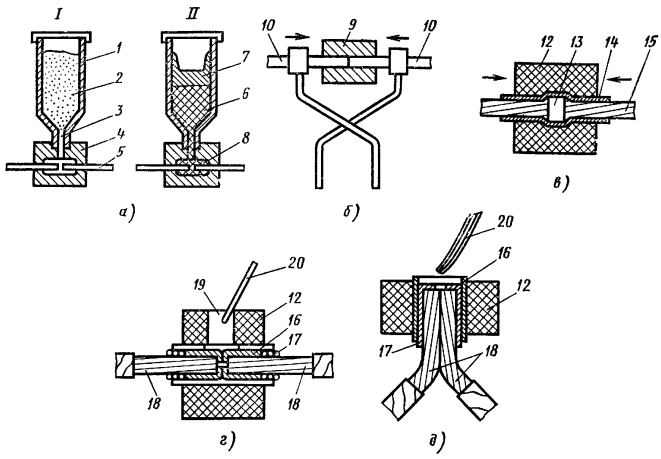


Рис. 121. Принципиальные схемы термитной сварки проводников и стержней:

а — термитно-тигельная сварка; *б* — термитно-муфельная сварка; *в* — термитно-муфельная сварка с осадкой проводов; *г* — термитно-муфельная сварка с присадкой; *д* — термитно-муфельная сварка по торцам; *1* — тигель; *2* — термит; *3* — литниковое отверстие; *4* — форма; *5* — стальные стержни; *6* — термитный металл; *7* — шлак; *8* — сварочное соединение; *9* — термитный муфель (шашка); *10* — провода; *11* — клещи; *12* — термитный муфель; *13* — алюминиевый вкладыш; *14* — кокиль; *15* — сталеалюминиевые провода; *16* — алюминиевый колпачок; *17* — асбестовое уплотнение; *18* — провода алюминиевыми жилами; *19* — литниковое отверстие; *20* — присадочный пруток

Наибольшее применение термитная сварка нашла в городском хозяйстве при строительстве и ремонте рельсовых трамвайных путей, меньше — железнодорожных путей и железобетонной арматуры в строительстве. Термитную сварку можно применять при ремонте литых стальных и чугунных деталей. Для сварки чугуна используют термит с высоким содержанием кремния (2,5—3,5%), который необходим для предотвращения отбеливания чугуна. Ведутся работы по термитной наплавке изношенных поверхностей.

СВАРКА В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ

Основные способы сварки электронных схем. Метод соединения микросхем должен удовлетворять следующим требованиям: прочность соединения должна быть близка к прочности соединяемых элементов микросхем; соединение должно иметь минимальное омическое сопротивление; основные параметры процесса соединения (температура нагрева, удельное давление и длительность выдержки) должны быть минимально возможными, с тем чтобы не повреждались элементы

схемы; выполнять соединение материалов разнообразных сочетаний и типоразмеров; после соединения не должно оставаться материалов, вызывающих коррозию; качество соединений должно контролироваться простыми и надежными методами.

Из общеизвестных способов сварки при производстве микроэлектронных схем применяют контактную точечную, ультразвуковую, холодную, диффузионную, электронно-лучевую, лазерную, аргонодуговую и микроплазменную.

Специально для целей монтажа микросхем разработано несколько оригинальных способов микросварки давлением: термокомпрессия, сварка давлением с косвенным импульсным нагревом (СКИН), ультразвуковая сварка с косвенным импульсным нагревом (УЗСКН), односторонняя контактная сварка (точечная и шовная).

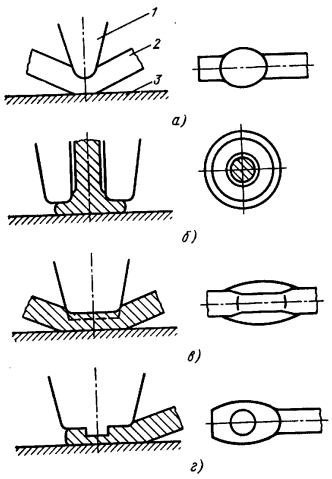


Рис. 122. Основные типы термокомпрессионных соединений:

а — соединение в виде плоской сварной точки (термокомпрессия клином); *1* — инструмент; *2* — проволока; *3* — подложка; *б* — соединение встык с образованием шарика; *в* — соединение с ребром жесткости (термокомпрессия инструментом с канавкой); *г* — соединение типа «рыбий глаз» (термокомпрессия инструментом с выступом)

Термокомпрессия — способ соединения металлов с металлами и неметаллами давлением с подогревом при относительно невысоких удельных давлениях.

По терминологии, принятой в сварке, более правильно термокомпрессию называть микросваркой давлением с подогревом соединяемых деталей.

Один из соединяемых материалов (обычно вывод) при термокомпрессии должен обладать достаточно высокой пластичностью. Температура при термокомпрессии не превышает температуры образования эвтектики соединяемых материалов и обычно равна температуре отпуска или отжига более пластичного металла.

Термокомпрессией можно соединять мягкие высокоэлектропроводные материалы в виде круглых и плоских проводников с полупроводниковыми материалами и электропроводными тонкими пленками, напыленными на хрупкие диэлектрические подложки. Основные типы термокомпрессионных соединений показаны на рис. 122.

Термокомпрессия является наиболее распространенным способом монтажа полупроводниковых микроприборов и интегральных схем в разнообразных корпусах гибкими проволочными проводниками.

Основными параметрами режима термокомпрессии с использованием статического нагрева являются усилие сжатия (давление p), температура нагрева соединения или инструмента T, длительность выдержки под давлением t.

Выбор давления определяется допустимой деформацией присоединяемого проводника и допустимым механическим воздействием на полупроводниковый прибор.

Усилие сжатия выбирают в зависимости от пластичности проводника, сочетания свариваемых материалов, диаметра проволоки и торца инструмента.

Давления при сварке алюминиевого проводника составляют 4—8 кгс/мм² и при сварке золотого проводника 10—14 кгс/мм².

Длительность выдержки устанавливается в зависимости от сочетания свариваемых материалов и определяется экспериментально путем оценки прочности соединений и может колебаться от 0,1 с до нескольких секунд.

Сварка давлением с косвенным импульсным нагревом (СКИН). Схема СКИН V-образным инструментом (пуансоном), нагреваемым импульсно проходящим по нему током, показана на рис. 123. Способ можно с успехом применять при монтаже гибридных интегральных схем. Он находит широкое применение в интегральных микросхемах, которые не допускают общего разогрева. Этим способом можно сваривать золотые, алюминиевые и медные проводники диаметром 20—100 мкм с разнообразными пленками, напыленными на диэлектрические или полупроводниковые подложки. При правильно подобранном режиме можно обеспечить высокое качество соединений и достаточно хорошую стабильность.

Односторонняя контактная сварка (рис. 124) — распространенный способ соединения различных электронных компонентов.

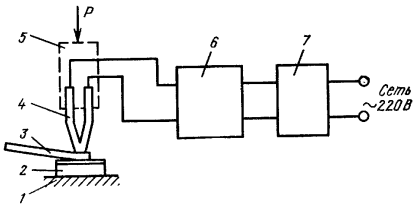


Рис. 123. Схема сварки давлением с косвенным импульсным нагревом V-образным инструментом:

1 — рабочий столик; *2* — подложка или полупроводниковый кристалл; *3* — проводник; *4* — V-образный инструмент (пуансон); *5* — сварочная головка для создания давления; *6* — источник питания; *7* — реле времени

При односторонней точечной контактной сварке (рис. 124, *а*) один электрод прижимает проволоку или ленту к контактной площадке, а второй электрод служит для подвода сварочного тока к контактной площадке. Этот способ применяют для сварки весьма тонких проводников (круглых и плоских) с относительно толстым материалом и для сварки проводников с электроосажденными пленками толщиной около 20 мкм.

Для присоединения круглых и плоских выводов навесных элементов к тонким пленкам на хрупких подложках и к печатному монтажу применяют контактную сварку сдвоенным электродом (рис. 124, *б*) и сварку строенным электродом трехфазным током (рис. 124, *в*).

При односторонней сварке сдвоенным или строенным электродом электроды устанавливают на верхнюю привариваемую деталь (проволоку, ленту) и прижимают к нижней детали. Таким способом можно с успехом приваривать проводники диаметром от 20 до 150—250 мкм из Au, Cu, Ag и других металлов к тонким пленкам на керамических подложках.

Одностороннюю шовную сварку коническими роликами применяют для герметизации металлостеклянных и металлокерамических корпусов микросхем металлическими крышками.

Ультразвуковая микросварка и комбинированные способы сварки успешно используются при изготовлении гибридных схем, транзисторов и интегральных схем. В микроэлектронике используются следующие способы ультразвуковой и комбинированной микросварки: сварка продольными и продольно-поперечными колебаниями (рис. 125, *а*); сварка крутильными колебаниями (рис. 125, *б*); сварка с косвенным импульсным нагревом (УЗСКН) (рис. 125, *в*); термокомпрессия с ультразвуком.

Основными параметрами процесса при ультразвуковой микросварке являются амплитуда колебаний рабочего торца инструмента, которая зависит от электри-

ческой мощности преобразователя и конструктивного исполнения колебательной системы; усилие сжатия свариваемых элементов; длительность включения ультразвуковых колебаний. При комбинированном методе сварки (УЗСКН) регулируемыми параметрами также являются температура нагрева инструмента или изделия, время относительного смещения импульса ультразвука и нагрева.

Процесс ультразвуковой микросварки продольными и продольно-поперечными колебаниями характеризуется малыми амплитудами колебаний (1—10 мкм) и относительно большими удельными давлениями (0,5—1 σ_c свариваемого материала).

Ультразвуковую микросварку применяют для выполнения монтажа гибкими проводниками, присоединения кристалла к корпусу, беспроволочного монтажа

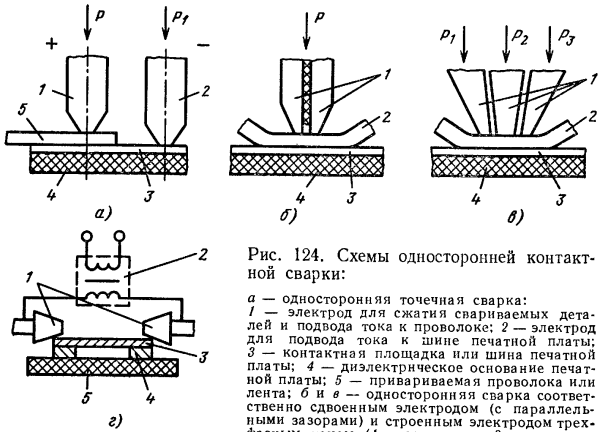


Рис. 124. Схемы односторонней контактной сварки:

а — односторонняя точечная сварка: *1* — электрод для сжатия свариваемых деталей и подвода тока к проволоке; *2* — электрод для подвода тока к шине печатной платы; *3* — контактная площадка или шина печатной платы; *4* — диэлектрическое основание печатной платы; *5* — привариваемая проволока или лента; *б* и *в* — односторонняя сварка соответственно сдвоенным электродом (с параллельными зазорами) и строенным электродом трехфазным током (*1* — электроды; *2* — привариваемый проводник; *3* — тонкая металлическая пленка; *4* — диэлектрическая подложка); *г* — односторонняя шовная сварка — пайка коническими роликами: *1* — конические ролики; *2* — сварочный трансформатор; *3* — крышка корпуса; *4* — металлическая рамка; *5* — керамическое основание корпуса микросхемы

интегральных схем методом «перевернутого кристалла», присоединения плоских выводов к кремниевым кристаллам диодов.

Холодная сварка осуществляется за счет пластической деформации свариваемых деталей под действием давления без дополнительного подогрева. Для получения высококачественного сварного соединения при холодной сварке необходимо обеспечить точную сборку и чистоту свариваемых поверхностей и необходимую степень деформации, зависящую от соединяемых металлов (от 35% для сочетания золото + золото до 80% для сочетаний медь + медь, медь + ковар и ковар + ковар.) В микроэлектронике этот способ применяется для герметизации металлостеклянных корпусов приборов.

Микросварка давлением с образованием эвтектики заключается в нагреве деталей до температуры образования эвтектики соединяемых материалов при одновременном сжатии и подаче колебаний (при необходимости). Способ наиболее приемлем для непосредственного присоединения плоских золоченых выводов к полупроводниковым кремниевым кристаллам, если требуется сравнительно большая площадь контакта (0,2—2 мм^2), при соединении кристаллов интегральных схем с золоченой поверхностью корпуса, при соединении медных лепестковых выводов, покрытых оловом, с золочеными выступами на кристалле ИС.

Микроплазменная сварка является разновидностью сварки плавлением. Отличительная особенность процесса — создание ионизированного потока инертного газа [смесь аргона с гелием (до 70%), с водородом (до 10—15%) или азотом]. Расплавление металла происходит сжатой дугой прямого действия и потоком плотной ионизированной плазмы. Этот способ сварки применяется для герметизации копусов приборов из ковара или никеля толщиной 0,1—0,3 мм. При этом сила тока составляет 5—10 А, скорость сварки 15—150 м/ч.

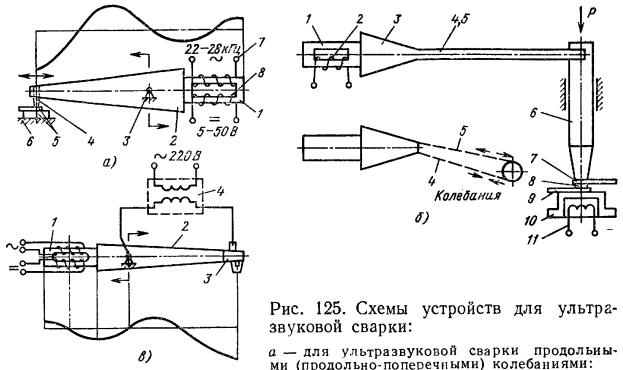


Рис. 125. Схемы устройств для ультразвуковой сварки:

а — для ультразвуковой сварки продольными (продольно-поперечными) колебаниями: *1* — магнитострикционный преобразователь; *2* — волновод; *3* — опора и устройство для создания усилия сжатия; *4* — сварочный инструмент (наконечник); *5* — свариваемые детали; *6* — опора для крепления деталей; *7* — обмотка возбуждения; *8* — обмотка подмагничивания; *б* — для ультразвуковой сварки крутильными колебаниями: *1* — преобразователь; *2* — обмотка возбуждения; *3* — концентратор; *4, 5* — волноводы; *6* — стержень, совершающий крутильные колебания; *7, 8, 9* — свариваемые изделия; *10* — столик; *11* — спираль для нагрева; *в* — для ультразвуковой сварки с косвенным импульсным нагревом: *1* — магнитострикционный преобразователь; *2* — волновод; *3* — сварочный инструмент; *4* — источник питания для нагрева сварочного инструмента

Лазерная сварка находит применение при монтаже различных элементов радиоэлектронной техники и при герметизации корпусов. Для микросварки наиболее широко используются лазеры на твердом теле (стекло с неодимом, алюмоиттриевый гранат) с энергией излучения 2—30 Дж и длительностью импульса 1—10 мс.

Электронно-лучевая сварка успешно применяется для герметизации радиоэлектронных устройств в металлостеклянных корпусах. Обычно используется импульсная сварка при ускоряющем напряжении 20—100 кВ и силе тока в луче до нескольких десятков миллиампер.

Диффузионная сварка в вакууме и в водороде начинает применяться в производстве микросхем для сварки термокомпенсаторов кристаллов и на других операциях.

Выполнение соединений в микросхемах. Применяется несколько схем монтажа полупроводниковых приборов и интегральных схем, в которых для соединения используются различные способы микросварки.

Наиболее широко распространенной схемой монтажа является соединение контактных площадок полупроводникового кристалла прибора, полученного

по планарной технологии, с внешними выводами корпуса с помощью гибких проводников. Один конец круглого проводника из алюминия или золота диаметром 10—300 мкм должен быть приварен к тонкой металлической пленке из алюминия или золота, напыленной на окисленный кремний, а другой — к золоченому или алюминированному ковару или к золоченой толстой пленке на керамическом основании корпуса.

При сборке кремниевых бескорпусных диодов плоские медные золоченые выводы присоединяют непосредственно к полупроводнику микросваркой давлением с образованием эвтектики.

Последовательность выполнения операций монтажа проволочных соединений между контактными площадками интегральных схем или транзисторов и выводами корпуса различными способами приведена в табл. 33.

При сварке термокомпрессией, косвенным импульсным нагревом и ультразвуком можно применять все варианты монтажа. При односторонней контактной сварке приемлемой является только сварка внахлестку по первым двум вариантам.

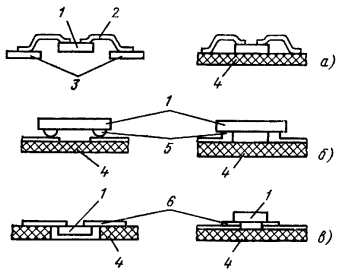


Рис. 126. Схемы беспроволочного монтажа микросхем:

1 — кристалл интегральной схемы; *2* — лепестковые выводы («паучки»); *3* — внешние выводы корпуса (ковар, покрытый золотом или алюминием); *4* — подложка схемы из керамики; *5* — столбиковые жесткие выводы (выступы); *6* — «балочные» выводы

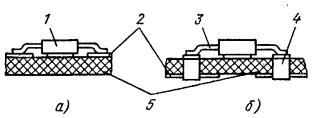


Рис. 127. Схема монтажа навесных элементов на печатные платы:

1 — навесной элемент (интегральная схема, транзистор, резистор); *2* — токоведущая дорожка печатной платы; *3* — вывод навесного элемента; *4* — металлический штырь; *5* — диэлектрическая плата (стеклотекстолит, гетинакс)

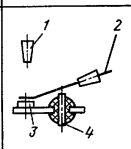
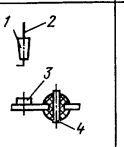
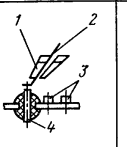
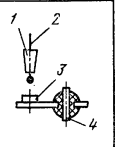
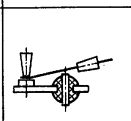
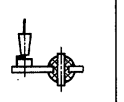
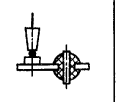
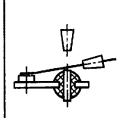
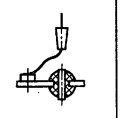
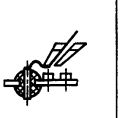
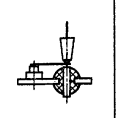
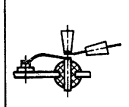
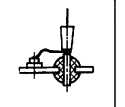
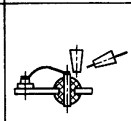
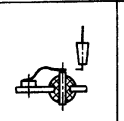
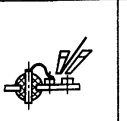
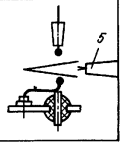
В гибридных интегральных схемах гибкие проводники сваривают с металлическими пленками (тонкими и толстыми), напыленными или выращенными гальванически на диэлектрических подложках (ситалл, поликор, алюмокерамика).

Разработаны и начинают широко применяться в промышленности беспроволочные методы монтажа интегральных схем, позволяющие максимально автоматизировать процессы их сборки. Беспроволочный монтаж выполняется по нескольким схемам, отличающимся конструктивным исполнением соединяемых элементов (рис. 126).

Наибольшее развитие получил способ монтажа лепестковых («паучковых») выводов к кристаллу и внешним выводам корпуса или контактным площадкам керамической подложки (рис. 126, *а*).

Для присоединения навесных элементов в гибридных схемах широко используется монтаж способом «перевернутого» кристалла с контактными выступами (столбиками) на подложке или кристалле (рис. 126, *б*). Находит применение и способ монтажа с балочными выводами, причем эти выводы могут быть как на кристалле полупроводникового прибора, так и на подложке гибридной схемы (рис. 126, *в*). При беспроволочных способах монтажа сваривают разнообразные сочетания материалов (Al—Al, Al—Au, Au—Au, Cu—Sn—Au и др.) и применяют различные типы соединений. При этом используются в основном групповые способы сварки (пайки), которые требуют более тщательного подхода к разработке и применению способов микросварки и рабочего инструмента.

33. Последовательность операций при создании проволочных соединений между контактными площадками

Название операции	Способ выполнения соединения			
	Внахлестку иглой с обрезкой проволоки краем инструмента или ножницами	Внахлестку капиллярным инструментом с обрывом проволоки (или с обрезкой ножницами)	Внахлестку инструментом „птичий клюв" с обрывом проволоки	Встык с образованием шарика и внахлестку с обрезкой или обрывом
Совмещение проволоки и инструмента с контактной площадкой (с выводом корпуса)				
Сварка первой точки				
Совмещение проволоки и инструмента с выводом корпуса				
Сварка второй точки				
Обрезка или обрыв проволоки				

Обозначения: 1-рабочий инструмент; 2-проволока; 3-контактная площадка 4-вывод корпуса; 5-горелка

Все способы беспроволочного монтажа разрабатывались в первую очередь с целью повышения производительности и надежности микросхем и снижения стоимости сборки и монтажа ИС и ГИС.

Монтаж навесных элементов с плоскими выводами в схемах на печатных платах выполняется несколькими способами сварки (или сварки-пайки) по двум вариантам (рис. 127): сварка плоских выводов приборов с токоведущими дорожками диэлектрической подложки (рис. 127, *а*) или с штырями, запрессованными в отверстия платы (рис. 127, *б*).

При монтаже навесных элементов на печатные платы могут быть применены следующие способы микросварки давлением: двусторонняя контактная точечная; односторонняя точечная сдвоенным электродом; ультразвуковая.

Из-за отклонения размеров выводов, токоведущих дорожек на подложке, толщины покрытия и т. д. для сварки плоских выводов обязательно применяют автоматическую подстройку режима в процессе сварки.

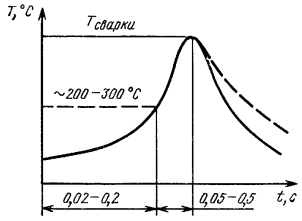


Рис. 128. Оптимальный термический цикл при сварке проводников с тонкими металлическими пленками на хрупких подложках

Параметры режимов сварки и свариваемость материалов микросхем. Свойства микросварных соединений, выполненных различными способами микросварки, зависят от следующих основных групп факторов:

сочетания свариваемых материалов, стабильности их механических свойств и состояния соединяемых поверхностей;

воспроизводимости параметров процесса сварки и эффективности применяемых систем регулирования и управления;

типа рабочего инструмента, обеспечивающего получение сварных соединений необходимой формы.

Трудности создания соединений в электронных микросхемах заключаются в специфике элементов и особенностях контактируемых пар: чрезвычайно большая разница в толщинах соединяемых элементов (проводники диаметром 20—750 мкм и пленки толщиной < 1 мкм) и большое различие физических свойств свариваемых элементов.

Для сварки проводников с тонкопленочными контактными площадками, напыленными на разнообразные подложки, применяется несколько способов в зависимости от сочетания свариваемых материалов выводов и контактных площадок (табл. 34).

При сварке проводников с металлическими пленками на изоляционных подложках из стекла, ситалла, керамики необходимо создать такой цикл нагрева свариваемых деталей, при котором не происходит разрушения подложки в зоне в результате термического удара.

Наиболее приемлемый термический цикл нагрева и охлаждения подложки в зоне сварки показан на рис. 128.

При монтаже выводов навесных элементов на печатные платы, которые нельзя нагревать до высокой температуры, требуется выполнять сварку при минимальной длительности импульса (менее 3—5 мс).

Наиболее распространенным способом соединения при монтаже приборов в корпусе проволочными выводами остается термокомпрессия (табл. 35).

При термокомпрессии круглых проводников с металлическими пленками существует область оптимальных параметров режима (температура и усилие сжатия), в которой обеспечивается максимальная прочность сварных соединений. Величина этой области зависит от сочетания свариваемых материалов и типа рабочего инструмента.

34. Свариваемость материалов выводов и контактных площадок различными способами сварки

Материал контактных площадок и подложек	Способы сварки и материал выводов																					
	Сварка сдвоенным электродом						Сварка давлением с косвенным импульсным нагревом				Ультразвуковая микросварка				Термокомпрессия нагретой иглой							
	Никель	Золото	Алюминий	Медь	Никель	Золото	Алюминий	Медь	Никель	Золото	Алюминий	Медь	Никель	Золото	Алюминий	Медь	Никель	Золото	Алюминий	Медь	Никель	Золото
Золотая пленка с подслоем нихрома на ситалле или стекле	—	++	—	++	—	++	++	+	—	++	++	+	—	++	+	—	—	++	+	—	—	+
Медная пленка с подслоем нихрома на ситалле	—	++	—	+	—	++	+	+	—	++	+	+	—	++	+	+	—	++	+	+	—	+
Алюминиевая пленка на ситалле или стекле	—	+	—	+	—	+	+	—	—	+	++	+	—	+	++	+	—	+	++	+	—	+
Алюминий на кремнии или на двуокиси кремния	—	—	—	—	—	++	+	—	—	++	++	—	—	+	++	—	—	+	++	—	—	—
Медная серебрёная фольга на гетинаксе или стеклотекстолите	—	++	—	++	—	++	+	+	—	++	—	++	—	+	—	++	—	+	—	++	—	+

Примечания: ++ — свариваются хорошо; + — свариваются удовлетворительно; — — не свариваются.

35. Ориентировочные режимы термокомпрессии некоторых сочетаний материалов

Материал проводника	Материал полупроводника или покрытия	Параметры режима		
		Температура нагрева, °С	Давление, кгс/мм²	Длительность сварки, с
Золото	Кремний	350—380	6—10	⩽ 10
	Германий	300—350	6—10	⩽ 5
	Алюминий, напыленный на SiO_2	280—320	6—10	0,05—2
	Золото, напыленное на SiO_2	250—370	6—10	
Алюминий	Кремний	400—450	4—7	⩽ 30
	Германий	300—400	4—7	
	Алюминий, напыленный на SiO_2	350—370	4—7	0,1—1,0
	Золото, напыленное на SiO_2	250—370	4—7	0,2—1,0

Примечание. Для конкретных условий режим термокомпрессии следует уточнять на технологических образцах с контролем прочности соединений.

Как и при термокомпрессии, при СКИН для каждого сочетания свариваемых материалов существует определенная область значений параметров режимов, в которой можно получить оптимальные свойства (прочность) сварных соединений (табл. 36).

36. Оптимальные режимы СКИН для некоторых сочетаний свариваемых материалов

Сочетание материалов		Технологические параметры процесса			Оптимальная деформация ε, %
Проводник	Пленка на ситалле	$T_к$, °С	p, кгс/мм²	$t_и$, с	
Au, ⌀ 24—80 мкм	Au, Al, Cu, Ni	300—550	8—14	0,1—0,5	50—60
Al, ⌀ 30—100 мкм	Au, Al	350—520	3—8		60—70
Cu, ⌀ 30—80 мкм	Au, Cu	400—650	15—20	0,1—1,0	55—65

Для соединения проводников из меди, золота, никеля, ковара и золоченого ковара толщиной 30—100 мкм с контактными площадками на диэлектрических подложках наиболее преспективным методом является односторонняя контактная сварка (табл. 37).

Ультразвуковой микросваркой соединяются круглые и плоские проводники с различными тонкими пленками, нанесенными на подложки из полупроводниковых или керамических материалов. Наиболее эффективно ультразвуковая сварка применяется для соединения трудносвариваемых другими способами материалов (алюминиевая, танталовая или ниобиевая пленка на керамических подложках с алюминиевым проводником и пр.).

При всех способах сварки круглых и плоских проводников к тонким пленкам на различных подложках прочность соединений в зависимости от технологических параметров имеет экстремум, который определяется величиной деформации проводника и характером разрушения соединения (по проводнику, с вырывом пленки, по плоскости соединения проводника с пленкой).

На рис. 129 показано влияние основных параметров ультразвуковой сварки (длительности t, усилия сжатия $F_{св}$ и амплитуды колебаний инструмента $\xi_{св}$) на прочность Q и коэффициент вариации прочности $\gamma = \frac{\sigma}{Q_{ср}} 100\%$ сварных соединений алюминиевой проволоки с алюминиевыми пленками. Сварку проводили

37. Свариваемость материалов элементов микросхем односторонней контактной сваркой

Материал контактной площадки и подложки	Материал проводников							
	Золото, $d < 0{,}1$	Медь без покрытия		Медь серебрёная или луженая		Никель		Ковар золоченый, $\delta < 0{,}15$
		$d \leqslant (0{,}1 \div 0{,}12)$; $\delta \leqslant (0{,}08 \div 0{,}1)$	$d \geqslant (0{,}1 \div 0{,}12)$; $\delta \geqslant (0{,}08 \div 0{,}1)$	$d < 0{,}15$, $\delta < 0{,}12$	$d \geqslant 0{,}15$; $\delta \geqslant 0{,}12$	$d < 0{,}1$; $\delta < 0{,}1$	$d \geqslant 0{,}1$; $\delta \geqslant 0{,}1$	
Медь ($\delta = 0{,}02 \div 0{,}05$) и стеклотекстолит или гетинакс	++	+	−	++	+	−	−	+
Медь луженая и стеклотекстолит	++	+	+	++	++	+	+	++
Медь серебрёная и стеклотекстолит	++	++	+	++	+	+	+	+
Никель золоченый ($\delta = 0{,}05 \div 0{,}1$) и стеклотекстолит	++	++	+	++	+	+	+	+
Серебро вожженное ($\delta = 0{,}05 \div 0{,}15$) и фотоситалл	++	+	−	++	−	−	−	+
Золото ($\delta = 0{,}001 \div 0{,}02$) с подслоем титана на ситалле или поликоре	++	++	−	+	+	−	−	+

Примечания. ++ — хорошая свариваемость; + — удовлетворительная; − — неудовлетворительная; δ — толщина контактной площадки или проводника, мм; d — диаметр проводника, мм.

на частоте 60 кГц инструментом с рабочим торцом шириной 90 мкм и поперечной канавкой. Прочность соединений проверяли при испытаниях на отрыв под углом 90°. При испытании разрушение соединений происходит по проволоке вдали от зоны сварки *а*, в месте наибольшей деформации проволоки *б*, с отслаиванием проволоки от пленки *в* и с отрывом части соединения *г*.

Из графиков определяются зоны оптимальных режимов A, в которых $Q > 0{,}5Q_{\text{пр-ки}}$ и $\gamma \leqslant 20\%$, а разрушение происходит по виду *б*. Эти зоны показывают, что наиболее критичным параметром является амплитуда колебаний и наименее критичным — длительность процесса. Усилие сжатия по своему относи-

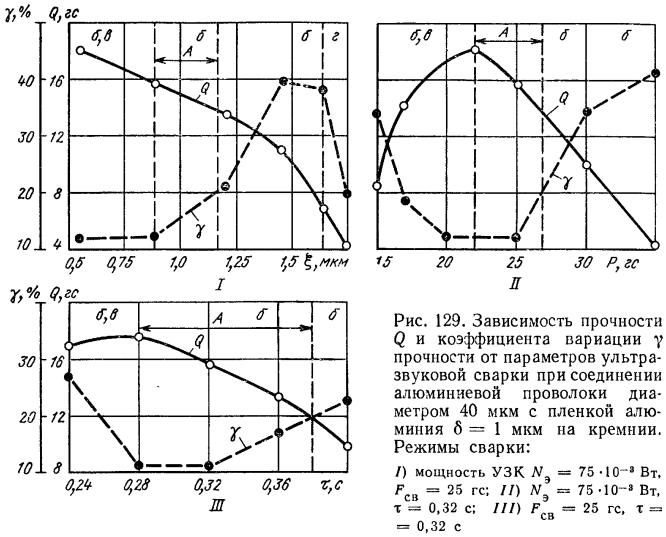


Рис. 129. Зависимость прочности Q и коэффициента вариации γ прочности от параметров ультразвуковой сварки при соединении алюминиевой проволоки диаметром 40 мкм с пленкой алюминия $\delta = 1$ мкм на кремнии. Режимы сварки:

I) мощность УЗК $N_э = 75 \cdot 10^{-3}$ Вт, $F_{св} = 25$ гс; *II*) $N_э = 75 \cdot 10^{-3}$ Вт, $\tau = 0{,}32$ с; *III*) $F_{св} = 25$ гс, $\tau = 0{,}32$ с

тельному влиянию на воспроизводимость прочности соединений близко к амплитуде колебаний.

Характер разрушения зависит от многих факторов, основными из которых являются:

полнота взаимодействия соединяемых материалов на контактных поверхностях;

величина пластической деформации проводника в зоне контакта;

форма сварной точки, которая зависит от рабочего профиля инструмента (пуансона, деформирующего привариваемый проводник);

адгезия пленки с подложкой или подслоем, которая может изменяться при воздействии сварочного импульса;

пластичность привариваемого проводника и уровень механических напряжений, возникающих в проводнике и подложке.

При выборе способа соединения и отработке режимов сварки обычно добиваются такого положения, чтобы разрушение соединения происходило по проволоке в зоне деформации или с отрывом части сварной точки от пленки и лишь иногда допускается разрушение с отслаиванием от пленки.

При этом требуется, чтобы прочность соединения составляла определенный процент от прочности проводника на разрыв или от прочности адгезии пленки с подложкой (от 30 до 100%), устанавливаемый в зависимости от условий эксплуатации изделия.

Контроль качества соединений в микросхемах. Все способы контроля качества сварных соединений можно разбить на два основных вида: испытания с разрушением соединений и испытания без разрушения как отдельных соединений, так и готовых микроэлектронных схем и приборов.

К разрушающим способам контроля относятся механические испытания соединений; микроскопические исследования на шлифах с применением обычных металлографических или электронных микроскопов; химический анализ (как обычный, так и с помощью электронного микрозонда).

К неразрушающим способам контроля можно отнести визуальный осмотр соединений и готовых приборов; оценку качества соединений с помощью щупов; испытания на герметичность корпусов; просвечивание рентгеновскими лучами; определение характера распределения температуры работающего прибора с помощью инфракрасных микроскопов; оценку электрических параметров готовых приборов.

Несколько промежуточное положение занимают испытания приборов и схем на надежность; ударные и виброиспытания, климатические испытания, испытания на термоудары, испытания на старение, длительные электрические испытания на наработку элементо-часов до первого отказа и другие испытания.

При анализе причин отказов какого-либо прибора сначала используют все возможные способы неразрушающих испытаний, а затем применяют разрушающие способы контроля.

Основные виды и причины дефектов сварных соединений и отказов микросхем приведены в табл. 38.

Для обеспечения высокой воспроизводимости качества наиболее целесообразно проводить контрольные испытания в несколько этапов: при испытании технологического оборудования; при выборе технологического процесса и подборе параметров режима сварки на данной установке; периодические производственные испытания для контроля технологического процесса; контроль качества и надежности готовых соединений и интегральных схем.

Механические испытания и металлографический анализ соединений являются наиболее эффективными способами контроля и оценки качества соединений в различных микроэлектронных схемах при отработке технологических режимов сварки или пайки.

Для оценки качества (прочности) сварных соединений тонких проводников с пленками на плоских подложках обычно проводят испытания на растяжение двумя способами: испытание на отрыв под углом 180, 90, 45 или 30° к поверхности подложки; испытание на срез параллельно поверхности подложки.

В реальных конструкциях проводники по отношению к подложке могут иметь угол от 5—8° до 60—75°.

При испытаниях на растяжение оценка ведется по разрывному усилию, которое сопоставляется с прочностью целого проводника на разрыв.

При металлографических исследованиях выявляются плохая адгезия напыленных пленок, пустоты в сварных и паяных соединениях, наличие интерметаллических структур, непровар (особенно при герметизации корпуса сваркой), микротрещины в подложке в зоне сварки, степень растворения напыленной пленки при сварке, форма и размеры сварных соединений.

Контроль внешним осмотром является одним из наиболее доступных и распространенных способов. Он применяется для пооперационного или выходного контроля. Цель контроля — оценка внешнего вида (микросоединений) путем сравнения их с эталонным образцом и выявление некачественных (дефектных) микросоединений при внешнем осмотре.

Обычно устанавливается 100%-ный визуальный контроль качества по внешнему виду микросоединений.

38. Виды и причины дефектов сварных соединений, отказов приборов

Вид дефекта	Причины дефектов	Возможный отказ прибора
Полупроводниковый кристалл		
Трещины в кристалле	Нарушение технологического процесса контакта	Обрыв в электрической цепи или изменение сопротивления
Низкая прочность присоединения кристалла к корпусу	Нарушение технологического процесса монтажа кристалла	Перегрев схемы при работе, обрыв электрической цепи, разрушение соединения
Соединения на кристалле и выводах корпуса		
Обрыв соединений	Загрязнение контактных площадок перед сборкой, нарушение режима сварки	Обрыв в электрической цепи
Неоднородности в соединениях	Плохой контроль производства, перегревы	Утечки в электрической цепи
Пустоты в соединениях	Нарушение технологического режима. Загрязнения. Проявление эффекта Киркендалла	Перегрев, низкая прочность, обрывы
Плохая адгезия пленок или соединений	Нарушение технологии сварки	Низкая прочность, обрывы
Плохое совмещение деталей	Плохой контроль технологического процесса	Замыкания, обрывы
Низкая прочность соединений	Плохой коитроль технологического процесса. Неправильное сочетание соединяемых материалов	Обрывы, ненадежные соединения
Корпус прибора		
Трещины вблизи выводов корпуса	Несогласованность материалов, плохое совмещение	Нарушение герметичности, течи в корпусе
Плохая адгезия покрытий	Нарушение технологии	Течи в корпусе, низкая прочность герметизации
Пустоты и поры в месте сварки крышки и корпуса	Плохой контроль производства, коррозия в зоне соединения	Нарушение герметичности
Плохое совмещение крышки и корпуса	Плохой контроль производства, нетехнологичная конструкция прибора	Нарушение герметичности, ухудшение качества внешнего вида
Низкая прочность сварки	Нарушение технологического процесса, неправильное сочетание соединяемых материалов	Ненадежные соединения, появление течей

Критерием оценки качества сварных микросоединений при визуальном контроле можно принять величину деформации проводника, определяемую по формуле

$$\varepsilon = \left(1 - 0{,}8\frac{d_{пр}}{B_{деф}}\right) 100\%,$$

где $d_{пр}$ — диаметр проводника, мм; $B_{деф}$ — ширина деформированной зоны проводника в месте сварки, мм.

Испытания на герметичность готовых приборов являются одним из важных способов для оценки качества герметизации корпусов и отбраковки потенциально ненадежных приборов и схем.

Негерметичность определяется по величине течи. За единицу измерения в СССР принята такая течь, при наличии которой в вакуумном объеме в 1 л давление возрастает на 1 мкм ртутного столба за 1 с (размерность л·мкм/с).

Способы контроля герметичности делятся на косвенные и прямые. К косвенным относятся испытания в камере влаги; испытания в водяной бомбе (оценка производится путем выдержки приборов и измерения электрических параметров приборов). Чувствительность способов составляет $1 \cdot 10^{-2}$—$1 \cdot 10^{-4}$ л·мкм/с.

К прямым способам контроля герметичности относятся испытание в горячей масляной ванне или этиленгликоле; вакуумно-жидкостное испытание; масс-спектрометрический способ (например, с помощью гелиевого течеискателя); радиоактивационный способ (с помощью радиоактивного газа).

Чувствительность прямых способов контроля герметичности составляет: в масляной ванне $1 \cdot 10^{-2}$—$1 \cdot 10^{-3}$ л·мкм/с; вакуумно-жидкостное испытание — $1 \cdot 10^{-4}$—$1 \cdot 10^{-5}$ л·мкм/с; гелиевым течеискателем — $1 \cdot 10^{-5}$—$1 \cdot 10^{-9}$ л·мкм/с; с помощью радиоактивного газа — $1 \cdot 10^{-3}$ — $1 \cdot 10^{-10}$ л·мкм/с.

Технологическое оборудование для сварки микросхем. При производстве микросхем используются два основных вида оборудования для сварки: оборудование для выполнения монтажных соединений при сборке ИС в различные типы корпусов и блоки аппаратуры; оборудование для герметизации корпусов.

Наибольшее количество моделей установок было разработано для монтажа ИС гибкими и плоскими проводниками.

Разработанное оборудование отличается применяемыми методами соединений, назначением установки, уровнем автоматизации и производительностью.

Назначение и характеристики отдельных типов установок для сварки микросхем приведены в табл. 39. В большинстве моделей оборудования применены системы автоматического регулирования процессом сварки. При термокомпрессии и сварке давлением с косвенным импульсным нагревом автоматическая подстройка осуществляется по температуре зоны соединения или рабочей части инструмента. При ультразвуковой микросварке активный контроль осуществляется путем анализа условий колебаний волновода (инструмента) в процессе сварки и своевременного прекращения колебаний в момент достижения минимума амплитуды. При односторонней контактной сварке наиболее универсальным принципом автоматической подстройки является принцип поддержания постоянным падения напряжения в зоне сварки (на электродах) вне зависимости от изменения электрического сопротивления (сечения) свариваемого проводника. При лазерной сварке автоматическая подстройка осуществляется по мощности излучения квантового генератора. В оборудовании для микросварки механизмы создания давления спроектированы с учетом их динамических характеристик и условий сварки.

В установках полуавтоматического типа обычно автоматизированы или механизированы почти все вспомогательные операции. Однако оператор выполняет наиболее сложную и утомительную операцию — совмещение инструмента (электрода) и вывода с контактной площадкой. Поэтому созданы установки, в которых оператор совмещает только первую точку (при числе точек до 72 и более), что позволяет обслуживать одному оператору до трех-пяти установок при значительном облегчении работы оператора.

Дальнейшую механизацию и автоматизацию микросварочного оборудования проводят в следующих направлениях:

39. Назначение и типы установок для сварки микросхем

Способ соединения	Модель установки	Основное назначение установки	Свариваемые материалы: Контактные площадки	Свариваемые материалы: Выводы	Производительность, соединений/ч	Примечание
Термокомпрессия	ЭМ-439	Монтаж выводов ⌀ 25—50 мкм к полупроводниковым приборам и ИС с образованием шарика	Алюминий, золото	Золото	До 1200	Полуавтомат с автоматической подачей проволоки
	ЭМ-422	Монтаж выводов внахлестку	Алюминий, золото	Золото, алюминий	До 2500	Подача проволоки автоматическая
Ультразвуковая микросварка	ЭМ-423М	Монтаж выводов ИС внахлестку	Алюминий, золото	Алюминий, золото	До 3000	УЗ-генератор на 60 кГц с автоматической подстройкой
	УЗП-03М	Монтаж выводов ИС с образованием шарика	Золото, алюминий	Золото	До 1800	
Давлением с косвенным импульсным нагревом	СКИН-1 ЭМ-429	Монтаж выводов внахлестку к элементам гибридных ИС	Золото, серебро, никель, медь	Золото, медь, алюминий	СКИН-1 до 250 ЭМ-429 до 1200	Импульсный источник питания
Односторонняя контактная сварка	ЭМ-429	Монтаж выводов ⌀ 25—60 мкм внахлестку в гибридных ИС	Золото, медь, никель, серебро	Золото, медь, никель, серебро	До 1200	Сварка сдвоенным электродом
	МС-3Р2-3	Сварка круглых и плоских выводов внахлестку на керамические подложки	Никель, золото, медь луженая	Медь, никель, золото	До 1800	Трехфазная сварка строенным электродом
Лазерная микросварка	Квант-12	Герметизация металлостеклянных корпусов микросхем	Ковар, сталь, никель, титан		Частота импульсов до 100 Гц, скорость сварки до 10 мм/с	Сварка одновременно двух сторон крышки с корпусом
Аргонодуговая сварка	УСКМ-4	Герметизация корпусов гибридных ИС с толщиной стенок 0,1—0,6 мм	Ковар, никель, сталь		Скорость сварки 8—55 м/ч	Сварка в камере с гелием и подачей аргона в горелку

автоматизация всех операций, включая совмещение, что позволяет увеличить число обслуживаемых оператором установок до 10 и более;

повышение быстродействия рабочих механизмов при управлении установками от микропроцессоров и микро-ЭВМ, что позволяет повысить цикловую производительность при проволочном монтаже до 14—20 тыс. сварок в час;

автоматизация технологического процесса монтажа групповыми методами сварки (одновременная сварка лепестковых выводов, сварка кристаллов со столбиковыми выводами и пр.);

совершенствование организации производства, широкое внедрение АСУТП и АСУП на монтажно-сварочном участке, создание автоматических линий сборки и сварки микросхем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вилль В. И.** Сварка металлов трением. Л. «Машиностроение», 1970, 181 с.
2. **Волков С. С., Орлов Ю. Н., Черняк Б. Я.** Сварка пластмасс ультразвуком. М., «Химия», 1974, 264 с.
3. **Гельман А. С.** Основы сварки давлением. М., «Машиностроение», 1970, 312 с.
4. **Диффузионные** процессы в твердой фазе при сварке. М., «Машиностроение», 1975, 272 с. Авт.: Л. Н. Ларинов и др.
5. **Евсеев Г. Б., Глизманенко Д. Л.** Оборудование и технология газопламенной обработки металлов и неметаллических материалов. М., «Машиностроение», 1974, 308 с.
6. **Ерохин А. А.** Основы сварки плавлением. М., «Машиностроение», 1973, 448 с.
7. **Казаков Н. Ф.** Диффузионная сварка в вакууме. М., «Машиностроение», 1976, 252 с.
8. **Клинопрессовая** сварка алюминиево-стальных переходников. ЛДНТП, 1973, 29 с. Авт.: М. Х. Шоршоров и др.
9. **Красулин Ю. Л., Назаров Г,** В. Мнкросварка давлением, М., «Металлургия», 1976, 160 с.
10. **Лесков Г. И.** Электрическая сварочная дуга. М., «Машиностроение», 1970, 335 с.
11. **Николаев Г. А., Ольшанский Н. А.** Специальные методы сварки. М., «Машиностроение», 1975, 231 с.
12. **Ольшанский Н. А.** Образование соединения при ультразвуковой сварке. — «Автоматическая сварка», 1971, № 3, с. 23—24.
13. **Оборудование** для электронолучевой сварки. Киев. «Наукова думка», 1973, 406 с. Авт.: А. И. Чвертко, О. Н. Назаренко, А. М. Святский и др.
14. **Патон Б. Е.** Сварка в мире будущего. — «Автоматическая сварка», 1963, № 2, с. 3—7.
15. **Рыкалин Н. Н., Шоршоров М. Х., Красулин Ю. Л.** Физические и химические проблемы соединения разнородных материалов. — «Известия АН СССР, Неорганические материалы», 1965, № 1, вып. 1, с. 72—77.
16. **Сверхпластичность** металлических материалов. М., «Наука», 1973, 289 с. Авт.: М. Х. Шоршоров и др.
17. **Седых В. С., Казак Н. Н.** Сварка взрывом и свойства сварных соединений. М., «Машиностроение», 1971, 72 с.
18. **Семенов А. П.** Схватывание металлов. М., Машгиз, 1958, 280 с.
19. **Спектор О. Ш., Асиновская Г. А.** Кислородная резка в металлургии. М., «Металлургия», 1972, 213 с.
20. **Спектор О. Ш.** Кислородно-флюсовая резка нержавеющих сталей. М., «Машиностроение», 1969, 173 с.
21. **Старченко Е. Г. и Любавский К. В.** Влияние конструкции сопла горелки на эффективность защиты зоны сварки. — «Сварочное производство», 1968, № 11, с. 13—16.
22. **Теоретические** основы сварки. М., «Высшая школа», 1970, 392 с. Авт.: В. В. Фролов, В. Г. Винокуров, В. Н. Волченко и др.
23. **Технология** электрической сварки металлов и сплавов плавлением. Под ред. Б. Е. Патона. М., «Машиностроение», 1974, 768 с.
24. **Холопов Ю. В.** Ультразвуковая сварка. Л., «Машиностроение», 1972, 152 с.
25. **Хренов К. К.** Сварка, резка и пайка металлов. Изд. 3-е, М., «Машиностроение», 1970, 408 с.
26. **Хренов К. К.** Холодная сварка металлов. М., НТО Машпром, 1972, 176 с.
27. **Шоршоров М. Х., Каракозов Э. С.** Особенности и перспективы развития сварки в твердой фазе. — «Вестник машиностроения», 1973, № 11, с. 32—37.
28. **Шоршоров М. Х., Каракозов Э. С.** Расчеты режимов сварки давлением. ЛДНТП, 1969, 27 с.
29. **Шоршоров М. Х., Красулин Ю. Л.** О природе физико-химических явлений в сварных и паяных соединениях. — «Сварочное производство», 1967, № 12, с. 1—7.
30. **Шоршоров М. Х., Мещеряков В. Н., Масленников В. Н.** Соединение никеля в условиях сверхвысокого вакуума. ЛДНТП, 1974, 31 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Автоматическая сварка неповоротных стыков труб 254—256
— — плавящимся электродом 242, 244
— — под флюсом 182, 183, 195, 196
Активация контактных поверхностей при сварке давлением 351—353
— — механическая 10
— — термическая 10
Атомно-водородная сварка 470—473

Б

Баланс тепла 235, 236, 261
Баланс энергии обобщенный 12, 14
— — ТП-и ПМ-процессов 14, 16
Барьер энергетический 9

В

Вакуумирование при диффузионной сварке 408
Ванная дуговая сварка плавящимся электродом 161
Взаимодействие металла с азотом 83, 204, 205
— — с водородом 83, 84, 205
— — с кислородом 82, 83, 204, 205
— — со шлаком 89—96
Взрывчатые вещества для сварки взрывом 373
Вибрационная сварка 400
Вольт-амперные характеристики дуги при сварке в защитных газах 198, 199, 239, 240, 458
— — шлаковой ванны при электрошлаковой сварке 265
Высококачественная скоростная кислородная резка 337

Г

Газокислородная резка под водой 468—470
Газопламенная сварка в вертикальном положении 328
— — в наклонном положении 328
— — встык деталей малых толщин 328
— — по отбортовке 328
— — угловых швов 327
Генераторы квантовые 439—445
Горелки газовые 325—327
— — плазменные 447, 448, 452
ГОСТ 111—65 158
1361—69 158
2246—70 180, 206, 329
2601—74 11, 157, 402
2671—70 329
5264—69 147, 150, 151
9466—75 158
9497—60 158
10157—73 81, 204
11534—75 147, 151
14651—69 158
14792—69 344
19140—73 157
19141—73 157
19142—73 157
19143—73 157
19521—74 11, 402

Д

Дефекты сварных соединений при сварке в микроэлектронике 491, 492
— — контактной 310—313
— — плавлением 146, 147
Деформации металлов при сварке в защитных газах 225
— — стыковой оплавлением 308
— — стыковой сопротивлением 308
— — точечной 309
— — холодной 358, 359, 360—362
— — шовной 309
Диаграмма удельной энергии 20, 21
— — фазового состава шва 138, 139
Диффузионная сварка без промежуточных прослоек 409, 410
— — в вакууме 483
— — с расплавляющейся прослойкой 410, 411
Дуга открытая угольная 23
— — плазменная 29
Дуговая сварка в защитных газах неплавящимся электродом листовых материалов большой толщины 227
— — погруженной дугой 221
— — по окисленной поверхности 219
— — при повышенном давлении защитной атмосферы 222
— — сжатой дугой 222
— — с непрерывным деформированием 227
— — с применением флюса 220
— — с фиксацией отбортованных кромок 226
Дуговая сварка в защитных газах плавящимся электродом с короткой дугой 232, 233
Дуговая сварка под флюсом 175

З

Зоны сварного соединения 98
— — структурных изменений 137—141
— — плавления 64, 418—423
— — термического влияния 176—178, 333, 344

И

Импульсно-дуговая сварка электродом вольфрамовым 244—250
— — плавящимся 250—253
Инерционная сварка 397, 398
Инструменты сварщика 157, 158
Источники быстродвижущиеся 26, 27
— — высокотемпературные — Излучение 39
— — нагрева при электрошлаковой сварке 259
— — теплоты 22, 41, 56—59
— — энергии 12—14, 16, 17

К

Категории стали по свариваемости 179
Катеты швов 191—194
Кислородная резка поверхностная 337, 338
— — флюсовая 334, 338, 339
Комбинированная струйная защита 213
Компоненты сварочных материалов 89—91
Контактная сварка деталей большой толщины 303
— — малой толщины 303
— — неравной толщины 303, 304
Контактная сварка оплавлением — Нагрев стержней 53, 54, 298 — Удаление окислов 306
— — сопротивлением — Нагрев металла 52, 297, 298
— — стыковая — Схема нагрева 50—52 — Соединение деталей 285
— — точечная — Нагрев листов 55 — Соединение деталей 286 — Удаление окислов 306, 307
— — шовная — Соединение деталей 287, 288 — Удаление окислов 306, 307
Константы магнитострикционных материалов 378
Контактно-шлаковая сварка 272
Концентрации равновесные 66, 67
Коэффициенты воздействия дуги 235, 239
— — для расчета нагрева стержней 51
— — для расчета нагрева электродов 48
— — мощности удельные 326
— — наплавки 16, 144, 145, 165
— — перехода по элементам 75, 78
— — потери электродного металла 144
— — приведения 44, 48
— — расплавления 16, 144, 237, 238
— — сосредоточенности пламени 16, 32
— — теплонасыщения 27, 35
— — теплопроводности 24, 200
— — усвоения элементов 172, 206, 207
— — формы кривой 251, 252
КПД горелок 448
— — квантовых генераторов 440—444
— — полный тепловой 343
— — термический 14, 16, 301, 304
— — термодинамический 14, 16, 20, 21
— — эффективный 14, 16, 22, 29, 31, 32, 38, 50, 145, 228, 237, 253
Критерии выбора режимов и технологии сварки металлов и сплавов, не имеющих полиморфных превращений 128—133
— — с большим объемным эффектом полиморфного превращения 117—120
— — с малым объемным эффектом полиморфного превращения 120—128

Л

Лазерная сварка 483
Лазеры импульсные 40
— — непрерывного действия 40

М

«Магнитное дутье» 151—153
Макроструктура мест разрушения сварных соединений 380

Масса ванны 153
— — наплавленного металла 144
— — расплавленного электродного металла 144
— — шлака относительная 90, 91
Микронеоднородность сварных соединений физическая 368—370
— — химическая 370, 371
Микросварка давлением с косвенным импульсным нагревом 481, 487, 488
— — с образованием эвтектики 482, 483
Микросварка плазменная 483
Многодуговая сварка 165, 166, 254
Многослойная сварка участками длинными 44, 45
— — короткими 45—48
Многоэлектродная сварка 165, 259
Монтаж проволочных соединений 484—486
Мощность источников при сварке стыковой 56
— — электрошлаковой 41
Мощность средняя акустическая 59
Мощность тепловая полная 22
— — удельная 57, 58
Мощность эффективная газового пламени 31, 32, 322
— — дуги 145, 235
— — плазменной дуги 29, 448, 450
— — плазменной струи 29, 30, 449, 450
— — электронно-лучевого нагрева 38

Н

Нагрев газовым пламенем массивного тела 34, 35
— — тонких металлических листов 33, 34, 36, 37
Нагрев материалов лучом лазера 39, 40
— — потоками излучения 38, 39
Нагрев металла при сварке дуговой 42—48
— — электрошлаковой 41, 42
Наплавка дугой валика 24, 25
— — электрошлаковая — Процесс 272
Напряженность электрического поля в месте нахождения заряда 411, 412
— — в столбе дуги 199
Номограмма для расчета нагрева стержня при контактной сварке оплавлением 53, 54
— — нагрева электрода из низкоуглеродистой стальной проволоки 49
— — необходимого расхода углекислого газа при сварке на ветру 211

О

Оборудование для сварки атомно-водородной 472, 473
— — в микроэлектронике 481, 483, 493, 495
— — диффузионной 401
— — под водой 464—466
— — световым лучом 446, 447
— — трением 395, 396
— — электронно-лучевой 426—428
Общий вид кинетического уравнения 68
Одновременная сварка трех заготовок 399, 400
Однопроходная сварка 42—44
Односторонняя контактная микросварка 481, 482
Оптимальный интервал скоростей охлаждения металлов 120—125, 129, 130
Орбитальная сварка 398, 399
Основность шлака 91—93
Основные параметры щитков и масок 158
— — электрододержателей 158
Особенности структуры и свойств сварного соединения при сварке плавлением 280—283

П

Параметры резки воздушно-плазменной 468
— — электрокислородной 468
Параметры сварки диффузионной 401—411
— — импульсно-дуговой 245—250
— — плазменной 451
— — ручной дуговой 145
— — термитной 473, 474
Перенос металла при сварке плавлением 228, 230—233, 251, 252
— — электронно-лучевой 419—421
Плазма — Понятие 447
Плазматрон режущий 340, 341, 468
Плазменная сварка дугой 453—458
— — плавящимся электродом 458—461
— — струей 450—454, 461
Плазменно-дуговая резка воздушная 346
— — разделительная 342
Плазмообразующие среды 344—346
Полуавтоматическая сварка в защитных газах 243, 244
— — плавлением лежачим электродом 162, 163

— — плавлением наклонным электродом 163, 164
Потолочная сварка 156
Предупреждение образования столбчатой структуры 100, 101
— — пористости 86—88
Присадочные материалы гранулированные 167
— — для сварки сплавов алюминия 130
Приспособления комбинированные 157
— — сборочно-сварочные 157
— — сварочные 157
Прочность соединений при сварке взрывом — Зависимость от параметров сварки 371
— — ультразвуковой 383
Пушки электронные — Устройство 416 — Характеристики 428—431

Р

Расход аргона при сварке электродом вольфрамовым 212, 255
— — плавящимся 212
Расход газа одним постом — Формула 213
Расчеты состава металла шва на основе данных о кинетике и термодинамике реакций 72—74
— — по известному составу наплавленного металла 74, 75
— — по коэффициентам перехода элементов 75
— — при отсутствии химических реакций 72
Реакции в ванне движущейся 70, 71
— — неподвижной 69, 70
Режимы машинной резки алюминия и его сплавов 347
— — меди и ее сплавов 347
— — микроплазменной 348
— — коррозионно-стойкой стали 346
— — углеродистой и низколегированной стали 345
Режимы резки воздушно-дуговой 349
— — кислородной 336, 339
Режимы сварки аргонодуговой 254, 255
— — атомно-водородной 471
— — взрывом 367
— — в микроэлектронике 488
— — газопламенной 325
— — импульсно-дуговой 250
— — контактной 314
— — микроплазменной 458—461
— — погруженной дугой 222
— — под водой 464
— — под флюсом 175—177, 184
— — трением 389
— — электрошлаковой 263
Резка кислородная поверхностная 337
— — флюсовая 337
Резка кислородная разделительная безгратовая 337
— — высококачественная 337
— — кислородом высокого давления 337
— — скоростная 336
Резка под водой — Виды — См. под ее названиями, например, *Газокислородная, Плазменно-дуговая, Термическая, Электродуговая, Электрошлаковая*
Резка электрическая — Классификация 339
Рельефная сварка 287
Ручная электродуговая сварка ванная плавящимся электродом 161, 162
— — погруженной дугой 161
— — спаренными электродами 161
— — электродами больших диаметров 161
— — электродами с повышенным коэффициентом наплавки 161

С

Свариваемость — Понятие 135, 487, 489
Сварка — Определение 10, 11 — Виды — См. под ее названиями, например, *Контактная сварка, Сварка плавлением* и т. д.
Сварка в защитных газах неплавящимся электродом автоматическая неповоротных стыков труб 254, 255
— — атомно-водородная 257
— — в углекислом газе угольным электродом 257, 258
— — дугой, управляемой магнитным полем 256
— — многодуговая 254
— — с применением горячей присадочной проволоки 256, 257
— — точечная W-электродом 254
— — трехфазной дугой 253
Сварка в защитных газах плавящимся электродом многоэлектродная 259
— — под водой 258
— — расщепленным электродом 259
— — с дополнительным нагревом проволоки 259
— — электрозаклепками 259
Сварка взрывом 362—375
Сварка в контролируемой атмосфере 213—214

Сварка в микроэлектронике — Виды — См. под ее названиями, например, *Диффузионная сварка в вакууме, Лавернаясварка, Микроплазменная сварка, Микросварка давлением с косвенным импульсным нагревом, Микросварка давлением с образованием эвтектики, Односторонняя контактная микросварка, Термокомпрессия, Ультразвуковая микросварка с косвенным импульсным нагревом, Холодная микросварка, Электронно-лучевая сварка*
Сварка в общую ванну 165
— — в раздельные ванны 165
Сварка в пространственном положении 154—156
Сварка газопламенная 319—330
Сварка давлением с косвенным импульсным нагревом 481
Сварка двух деталей с помощью третьего тела 399
Сварка дуговая в среде защитных газов — Классификация 197
Сварка магнитно-импульсная 357
Сварка несколькими дугами в раздельные ванны 166
Сварка плавлением в защитных газах 196—259
— — дуговая ручная 144—164
— — под флюсом 164—196
— — электрошлаковая 259—283
Сварка погруженной дугой (с глубоким проваром) с опиранием электрода 161
Сварка под водой 461—466
Сварка под флюсом высокоуглеродистой стали 180
— — низкоуглеродистой и низколегированной низкоуглеродистой стали 179—181
— — среднелегированной теплоустойчивой и конструкционной стали 181
— — среднеуглеродистой стали 180
— — стыковых многослойных односторонних и двусторонних швов 186—188
— — угловых швов 188—191
Сварка световым лучом 439—447
Сварка со струйной защитой шва 207
Сварка трением — Виды — См. под ее названиями, например, *Вибрационная сварка, Инерционная сварка, Одновременная сварка трех заготовок, Орбитальная сварка, Сварка двух деталей с помощью третьего тела*
Сверхпластичность — Явление 355, 356
Сегрегация примесей межзеренная 105
— — нормальная 104
— — обратная 105, 106
— — ячеисто-дендритная 105
Соединения сварные — Основные типы 147—150 — Этапы формирования 288—290
Сопротивления при нагреве металла контактные 294
— — электрические 290
Сопротивляемость образованию холодных трещин при сварке титановых сплавов 128, 131, 132
Способы газовой защиты 207, 214
— — повышения проплавляющей способности дуги 219—228
— — повышения стабильности процесса сварки в защитных газах 214—219
Способ сварки клинопрессовый (теплопрессовый) 356, 357
Способы удаления газовых пузырьков 88, 89
Стадии сварки давлением — Образование физического контакта 351 — Активация контактных поверхностей 351—353 — Объемное взаимодействие 353—357
Структура сварного соединения 137—140

Т

Температура критическая по видам сварки 174
— — сварочной ванны при электрошлаковой сварке 65
Термитно-муфельная сварка 478, 479
Термитно-тигельная сварка 478, 479
Термическая резка под водой 466
Термический цикл при многослойной сварке участками длинными 45
— — короткими 46
Термокомпрессия 480, 481, 484, 488
Типы разделки кромок 187, 324
Типы соединений при сварке в защитных газах 223—225
— — в микроэлектронике 480
— — газопламенной 323, 324
— — ручной дуговой 147—151
— — электрошлаковой 272—274
Ток сварочный 223, 236, 250
Траектории роста кристаллитов в сварочной ванне при кристаллизации — Схемы 100
ТУ 11 СУ 021.099—72 215
11 Яе о.021.056—72 215
48—19—27—72 215
48—19—39—73 215

У

Ультразвуковая микросварка с косвенным импульсным нагревом 481—483
Ультразвуковая сварка 375—387
Участки соединений при сварке плавлением 97

Ф

Факторы, влияющие на свариваемость металлов 135, 136
Флюсовая резка 337—339
Флюсы при кислородной резке — Состав 338

Х

Холодная микросварка 482
Холодная сварка 358—362

Ч

Число слоев шва при сварке 155

Ш

Швы при сварке под флюсом стыковые 183—188
— — угловые 188—195
Шовная сварка 286, 287, 306

Э

Эквивалент по углероду — Формулы 141, 191

Электрическая резка 339—350
Электрододержатели — Требования к конструкции 158 — Конструкции 467
Электродуговая резка под водой 466
Электроды активированные вольфрамовые — Применение 214, 215, 218
— — для сварки под водой — Применение 462
— — прутковые — Нагрев 48
Электрокислородная резка под водой 466—468
Электронно-лучевая сварка 38, 415—428, 483
Электрошлаковая сварка кольцевых швов 278—280
— — ленточным электродом 271, 272
— — многопроходная 280
— — однопроходная 280
— — плавящимся мундштуком 270, 271
— — проволочными электродами 269, 270
— — прямолинейных швов 277
— — Электродами большого сечения 271
Элементы легирующие — Потеря из проволоки 89
Энтальпия сварочной ванны при электрошлаковой сварке 64, 65
Эффект дилатометрический 289, 305

Я

Ядро — Критический диаметр 312

ИБ № 79

Кирилл Васильевич ВАСИЛЬЕВ, Вадим Иванович ВИЛЛЬ, Владимир Никитич ВОЛЧЕНКО и др.

СВАРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ

Том 1

Редакторы *М. С. Хухлин, И. И. Лесниченко*

Художественный редактор *П. П. Рогачев*

Технические редакторы *Е. П. Смирнова, В. И. Орешкина*

Корректоры *А. П. Озерова* и *Ж. Л. Суходолова*

Переплет художника *А. Я. Михайлова*

Сдано в набор 26.08.77. Подписано в печать 19.05.78. Т-09412. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 31,5. Уч.-изд. л. 43,5. Тираж 40 000 экз. Зак. 1475. Цена 2 р. 60 к.

Издательство «Машиностроение» 107885,
Москва, Б-78, 1-й Басманный пер., 3

Ордена Октябрьской Революции, ордена Трудового Красного Знамени Ленинградское производственно-техническое объединение «Печатный Двор» имени А. М. Горького Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 197136, Ленинград, П-136, Гатчинская ул., 26.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МАШИНОСТРОЕНИЕ»

НОВЫЕ КНИГИ

по сварочному производству

Выпуск 1978 года

Вайнбойм Д. И., Веселков В. Д., Ратманова Ж. В. **Наладка сварочного и газорезательного оборудования.** Учебное пособие для профессионально-технических училищ. 22 изд. л. 66 к.

Гуляев А. И. **Технология точечной и рельефной сварки сталей.** Изд. 2-е, перераб. и доп. 16 изд. л. 1 р. 20 к.

Думов С. И. **Технология электросварочной сварки плавлением.** Учебник для техникумов. Изд. 2-е, перераб. и доп. 23 изд. л. 91 к.

Зайцев К. И., Мацюк Л. Н. **Сварка пластмасс.** 16 изд. л. 1 р. 20 к.

Кисельников В. Б. **Пневматические приводы и аппаратура электросварочного оборудования.** 16 изд. л. 1 р.

Кравцов Т. Г. **Электродуговая наплавка электродной лентой.** 10 изд. л. 55 к.

Охрана труда при сварке в машиностроении. 8 изд. л. 45 к. Авт.: М. З. Брауде, В. П. Некрылов, В. А. Тамбовцев, С. Я. Ландо.

Петров Г. Л., Буров Н. Г., Абрамович В. Р. **Технология и оборудование газопламенной обработки металлов.** Учебник для техникумов. Изд. 3-е, перераб. и доп. 17 изд. л. 75 к.

Плакирование стали взрывом. 14 изд. л. 1 р. 10 к. Авт.: А. С. Гельман, А. Д. Чудновский, Б. Д. Цемахович, И. Л. Харина.

Технология и оборудование сварки плавлением. Учебное пособие для вузов. 25 изд. л. 1 р. 30 к. Авт.: Г. Д. Никифоров, Г. В. Бобров, В. М. Никитин, В. В. Дьяченко.

Приобретайте новые книги
издательства «Машиностроение»
в магазинах, распространяющих техническую литературу!