К.А.КОЧЕРГИН

КОНТАКТНАЯ СВАРКА



ЛЕНИНГРАД
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1987

ББК 34.641
К75
УДК 621.791.357

Рецензенты: К. К. Палевич, канд. техн. наук В. В. Смирнов
Редактор д-р техн. наук В. В. Башенко

Кочергин К. А.

К75 Контактная сварка. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние. 1987. — 240 с.: ил.

(В пер.) 1 р. 20 к.

В книге изложены основы теории и технологии всех способов контактной сварки. Описаны электротепловые, энергетические и металлофизические процессы в свариваемых контактах и сварных соединениях. Рассмотрены вопросы проектирования оборудования, организации производства и контроля качества контактной сварки. Все технологические процессы и способы контактной сварки даны применительно к типовым конструкциям и деталям из сталей и сплавов, используемых в машиностроении и приборостроительной промышленности.

Книга предназначена для технологов и руководителей сварочных участков и цехов.

К $\frac{2704060000\text{-}269}{038\ (01)\text{-}87}$ 269-87

ББК 34.641
6П4.3

ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ИЗДАНИЕ

Константин Алексеевич Кочергин

КОНТАКТНАЯ СВАРКА

Редактор *Р. Н. Михеева*. Художественный редактор *С. С. Венедиктов*. Технический редактор *А. И. Казаков*. Корректоры *Т. Н. Гринчук, И. Г. Иванова*. Переплет художника *В. И. Широколобова*

ИБ № 4081

Сдано в набор 27.01.87. Подписано в печать 31.03.87. М-18313.
Формат 60×90¹/₁₆. Бумага офсетная № 2. Гарнитура литературная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 15,0. Усл. кр.-отт. 15,0. Уч.-изд. л. 15,37.
Тираж 25 000 экз. Заказ 27. Цена 1 р. 20 к.

Ленинградское отделение ордена Трудового Красного Знамени
издательства «Машиностроение».
191065, Ленинград, ул. Дзержинского, 10.

Ленинградская типография № 6 ордена Трудового Красного Знамени
Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой
Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
193144, г. Ленинград, ул. Моисеенко, 10.

© Издательство «Машиностроение», 1987.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Все основные технические достижения нашего века — развитие атомной и авиационной промышленности, успехи строительства, машиностроения и радиоэлектроники — определяются, в первую очередь, развитием технологии. В связи с этим следует дать общую формулировку этого понятия. *Технология* — это процесс взаимодействия вещества и энергии, организованный в определенной среде с целью создания новых материалов, новых конструкций, новых машин и даже новых сооружений.

Машиностроительному комплексу принадлежит исключительно важная роль в реализации задач, поставленных XXVII съездом КПСС по дальнейшему ускорению экономического и социального развития советского общества. Однако новое машиностроительное оборудование будет работать наиболее эффективно и производительно в том случае, если в основе его действия будут лежать новые прогрессивные технологические процессы.

Если в качестве вещества, подвергаемого обработке, рассматривать металлы и сплавы, а конечным технологическим результатом считать сварные соединения и конструкции, то сварочная технология поистине не имеет границ применения ни в современности, ни в будущем. Это определяется таким энергетическим богатством и разнообразием сварочного производства, каким не обладает ни одна другая отрасль обработки металла. О таком именно богатстве говорится и в «Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года», утвержденных на XXVII съезде КПСС: «Расширить в двенадцатой пятилетке в 1,5—2 раза применение прогрессивных базовых технологий. Обеспечить широкое внедрение в народное хозяйство принципиально новых технологий — электронно-лучевых, плазменных, импульсных, ..., позволяющих многократно повысить производительность труда ...».

Современные процессы сварки давлением — это и есть одна из разновидностей импульсных технологий. Контактная точечная сварка современных конструкций ответственной службы целиком построена на принципах синхронного сочетания импульсных режимов электрической и механической энергии. Импульсные принципы построения режимов стыковой контактной сварки, разработанные Институтом электросварки им. Е. О. Патона, стали обеспечивать непревзойденное качество сварных соединений магистральных трубопроводов. Дальнейшее развитие новых способов контактной сварки будет определяться сочетанием новых программ приложения электрофизической и механической энергий к металлу.

Отзывы и замечания по книге просим направлять по адресу: 191065, Ленинград, ул. Дзержинского, 10, издательство «Машиностроение».

ВВЕДЕНИЕ

Около 35 лет тому назад появились и стали привлекать к себе внимание некоторые новые для того времени процессы сварки. Среди них оказались: холодная, сварка трением, ультразвуковая, взрывом и другие, для которых механическое давление было главной и обязательной технологической операцией. Возникла необходимость не только формально выделить эти виды сварки. Они оказались особыми и по технологической сущности, и по времени появления. Последний показатель подсказал название: «новые способы сварки». Это термин свое существование оправдывал недолго. В производство начали вводиться еще более новые виды сварки: плазменная, электронно-лучевая и лазерная. Стало ясно, что в направлении реализации новых процессов сварка способна развиваться бесконечно.

Заслуженный деятель науки и техники профессор Николай Оскарович Окерблом все известные в 50—60-х годах способы сварки предложил тогда же разделить на две группы: плавлением и давлением. Название привилось и было принято повсеместно, всеми школами. Однако сейчас и такое разделение начинает казаться недостаточным.

Для современных концентраций энергии в металлических деталях процессы идут далеко за пределами кипения металла и все ближе подходят к атомно-электронным процессам и масштабам, а в ближайшем будущем подойдут к ядерным.

Таким образом, изучение современных сварочных процессов совсем не обязательно связывать с той или иной рекомендуемой классификацией способов сварки. Гораздо существеннее научиться понимать физические явления в свариваемом контакте между деталями в зависимости от тех видов энергии, которые используются при разных способах сварки. Нужно отметить при этом, что никакая другая отрасль обработки металла, кроме сварки, не располагает в своем арсенале таким широким ассортиментом видов энергии. Достаточно перечислить хотя бы такие основные виды энергии, обеспечивающие так называемые процессы сварки плавлением:

1) энергия горения (газовая и термитная);

2) дуговой, искровой и другие виды электрического разряда;

3) плазменная энергия;
4) джоулева теплота;
5) энергия электронного луча;
6) энергия лазерного излучения.

Каждый из перечисленных видов энергии переходит (по первому закону термодинамики) в энергию тепловую, доводя температуру металла в зоне свариваемого контакта до величин, иногда весьма превышающих точки плавления и в сотни тысяч раз больших, чем это необходимо для связи пограничных кристаллических слоев металла. Отсюда неизбежна тепловая инерция металла зоны свариваемых контактов при приложении всех перечисленных выше видов энергии.

Но есть еще и седьмой вид энергии — энергия механическая, которая может быть какой угодно: инерционной статической, вибрационной, знакопеременной и, самое существенное, ударно-импульсной, т. е. вовсе безынерционной.

Если комбинация каких-либо двух видов энергии из шести, перечисленных первыми, для одного и того же способа сварки встречается редко, то комбинация разнопрограммированной механической энергии с любым другим видом энергии создает все известные современные способы сварки. Мало того, будут создаваться еще и новые, пока не известные сварочные процессы из комбинаций двух видов энергии, одна из которых — безынерционная механическая. Но и это не все, чем замечательна механическая энергия. Она одна определяет целую серию новых, весьма эффективных процессов сварки (холодная, взрывом, трением). Для сварочной технологии механическая энергия используется, главным образом, как сдавливающая сила. При этом, если в редких случаях сдавливаемый объем металла не имеет возможности пластического течения, то сдавливающая сила создает всестороннее сжатие. Если сдавливаемый объем может течь и деформироваться, то операция сдавливания неизбежно и обязательно превращается в сдвиговый процесс и этим процессом завершается. Сдвиг по плоскости свариваемого контакта в зависимости от вида сварного соединения и нашего желания может быть одного направления, радиально растекающимся или вращательным.

Сдвиг по плоскости контакта и только сдвиг — вот обязательная завершающая операция любого способа сварки давлением, в том числе и электрической контактной сварки.

Именно с этих позиций в данной книге впервые рассматриваются процессы формирования сварных соединений при электрической контактной сварке. Такое название за ней и должно оставаться, поскольку оно определяет главную часть энергии, необходимую для создания сварного соединения. Однако это не значит, что механическая энергия, используемая при электрическом нагреве контакта, будет и впредь играть вторую роль. Да она и сейчас вторая, но не второстепенная. Для того чтобы наглядно убедиться в огромных и неисчерпаемых возможностях механической энергии,

как самой по себе, так и в совокупности с другими видами энергии, рассмотрим некоторые элементарные схемы сварки.

Каждая металлическая деталь в реальных условиях покрыта защитным слоем оксидной пленки с дополнительными адсорбентами на ней. Если речь идет о сварке плавлением, за счет любого из перечисленных выше шести видов энергии обеспечиваем соединение деталей слоем самопроизвольно кристаллизирующего расплава толщиной δ. Этот слой, получивший энергию $kn\theta$ (Дж/см^3), по прочности металла может быть хуже основного, равен ему или лучше его. Все это во власти технологии. Толщина δ химически и структурно постороннего металла в сотни тысяч раз превышает тот двойной слой поверхностных кристаллов, которые могли бы сформировать непрерывную кристаллическую структуру и создать прочное сварное соединение. Если такая задача ставится, то в действие вводится второй вид энергии — механическая. Давление, обеспечивающее осадочную операцию, может вытеснить практически весь слой δ химически и структурно разнородного металла и обеспечить соединение действительно однородных элементарных кристаллов только с различной структурой зерен и с различным насыщением микродефектами этой структуры. Отсюда хотя и очевидный, но необходимый вывод: для обеспечения сварного соединения свариваемые контакты могут получать любые соотношения двух видов энергий. Это и есть акты физической активации металла. Однако самым главным является не статическое соотношение тепловой и механической энергий, а динамика изменения их во времени, особенно механической энергии. Важна не только общая величина последней (непосредственно число джоулей), которая может быть введена в деформируемый металл, — это сила, умноженная на путь, но и скорость, с какой прикладывается эта сила.

Отсюда ясно, что недостаточная тепловая активация или даже ее полное отсутствие может с избытком компенсироваться скоростной механической деформацией. Следовательно, для каждого температурного состояния контакта существует определенная сила сдавливания, прикладывая которую с определенной скоростью, обязательно получаем качественное сварное соединение. Существует, таким образом, непрерывный ряд значений давления, осуществляемых с соответствующими скоростями, для непрерывного ряда температур — от комнатной до точки плавления. Однако ударно-импульсные давления, или скоростные сдвигово-поворотные для электроконтактного нагрева практически не используются.

Для процессов сварки понятия температуры и давления неотделимы друг от друга, поскольку они определяют энергию кристаллов. Деление всех способов сварки на две группы (плавлением и давлением) отображает только чисто внешние технологические действия. Что же касается физической сущности всех сварочных процессов, то для них единственно общим является количество вводимой в металл энергии и программа введения ее во времени. Однако

раздельное, долевое участие механической энергии все же различается. Механическая энергия вводится в виде силы: статической, ударной или вибрационной. Эта сила может деформировать макромасштабный объем и тем самым активировать весь этот объем за счет массовой всеобщей деформации электронных конфигураций. Но механическая сила, приложенная к плоскости контакта, может деформировать (и притом неодинаково) отдельные микрообъемы. Неодинаковая механическая деформация создает неоднородную активацию электронных плотностей. Этот факт определяет энергетический и, следовательно, электрический контраст между соседними неравномерно деформированными микрообъемами. Электрический контраст выражается разностью электрических потенциалов (мВ); а электрическое сопротивление металла между деформированными микрообъемами составляет микроомы. Следовательно, плоскость механического контакта — это поле электрических замкнутых токов еще без приложения какой-либо электрической, а только механической энергии. Отсюда видно, насколько еще пока примитивно во многих случаях мы рассматриваем электрическое сопротивление свариваемых контактов, если имеем в виду только статическую силу, действующую на контакт.

До сих пор было как-то очень привычно считать, что электронные конфигурации и электронные концентрации подвластны только электрическим силам и температуре, но природа предусмотрела значительно бо́льшие возможности для этого. Каждый вид механической обработки металлической поверхности различным образом изменяет приповерхностные значения плотности электронов и тем самым заставляет эмиттировать в пространство электроны с относительно высокой энергией.

Испускание электронов металлическими поверхностями под влиянием механической обработки получило название экзоэлектронной эмиссии. Исследование этого процесса показало, что металлическая поверхность может получить значительную способность эмиттировать электроны за счет механической деформации, разрыва, сдвига, трения, изгиба. Интенсивность экзоэлектронной эмиссии носит пока что загадочный характер. Длительность эмиссии иногда определяется десятками минут после механической деформации, а максимум эмиссии наступает через несколько минут. Например, на алюминиевой поверхности максимум эмиссии от момента трения поверхности со сдвигом наступил через 2 мин, а полностью эмиссия угасла только через 30 мин, на железной — максимум через 5 мин, а угасание через 30 мин. Эффект электрической, а следовательно, и структурной перестройки оказывается, как видно, весьма растянутым по времени.

Ток экзоэлектронной эмиссии измеряют и тем самым определяют интенсивность механических деформаций. Для стационарных механических контактов эти измерения не нужны и неинтересны, так как эмиссия, даже если она и не угасла, не оказывает

влияния на чисто механическую деформацию поверхностных слоев металла. Что же касается электрических свариваемых контактов, с которыми приходится иметь дело при точечной и шовной сварке, то здесь о существовании экзоэлектронной эмиссии следует помнить. Это значит, что важно не только учитывать, как обработаны (с точки зрения, например, шероховатости) контактирующие поверхности, но и сколько времени прошло после этой обработки.

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что механическая энергия, вводимая в свариваемый контакт, создает не только механические деформации, но порождает сложный физический комплекс электрических эффектов. Отсюда следует, что технолог в своем мышлении не должен замыкаться на учете действия только явно видимых внешних сил. Имея в виду принцип всеобщей связи явлений, надо думать и о других, сопутствующих и невидимых силах, далеко не всегда играющих второстепенную роль.

Глава 1

СВАРИВАЕМЫЙ КОНТАКТ И ПРОЦЕССЫ ЕГО АКТИВАЦИИ

1.1. Структура и геометрия металлических поверхностей

В технологии машиностроения занимаются лишь геометрией металлических поверхностей. Для сварочной технологии кроме геометрии необходимо исследовать физические процессы, которые происходят на поверхностях свариваемых деталей. Процессы эти разнообразны, динамичны и очень сложны по своей физической природе. Для сварочной технологии, на современном ее этапе, полезно рассмотреть все, что происходит на поверхности металла от момента ее подготовки к сварке до самого сварочного процесса. Наиболее удобно анализировать поверхностные явления на металле, используя следующую модель. Представим себе, что разрываем металлический образец. До разрыва внутренние слои металла были абсолютно свободны от всяких посторонних загрязнений. Они были построены в виде нормальных кристаллических структур, с обычными для реального металла дефектами. Поверхность разрыва в момент ее образования идеально чиста. Такую чистоту называют ювенильной. Обнажающиеся при разрыве кристаллические грани элементарных кристаллов особенно и необычайно подвижны. В первые же миллионные доли секунды бóльшая часть свободных электронов покидает кристалл и образует над его гранями подвижное отрицательно заряженное облако. Вслед за этим эффектом, а затем и одновременно с ним все острые кристаллические грани размываются, придавая острым выступам округлые очертания: при выравнивании и закруглении рельефа поверхностная энергия уменьшается.

Электронное облако над поверхностью и избыточный положительный потенциал кристаллов создают прочный и стойкий двойной электрический слой (рис. 1.1, *а*). Такой слой может существовать только в абсолютном вакууме. Если же разрыв металла произошел на воздухе, то двойной пограничный слой может возникнуть только как первый импульсный эффект. Электронное облако без промедления (рис. 1.1, *б*) активирует молекулы кислорода в окружающей атмосфере, которые с большой скоростью образуют оксидную пленку. Электрическая структура пленки непрерывно сохраняет разнополярность внутреннего и наружного слоев. Если первый электронный слой возникает мгновенно, то он мгновенно же вступает во взаимодействие с молекулами кислорода, активи-

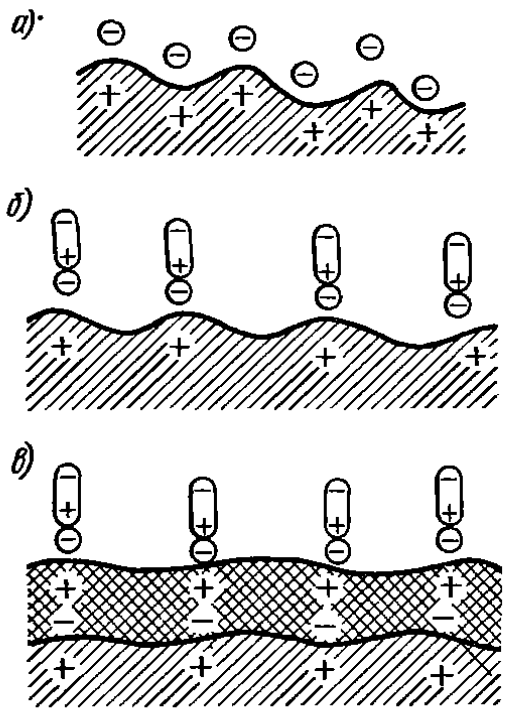


Рис. 1.1. Структура слоев на металлической поверхности

зируя их на образование химической связи с металлом. Над поверхностью металла образуется рыхлое и подвижное облако ионов металла, его оксидов и свободных электронов. В этом облаке самой активной составляющей и притом длительно, в течение минут и даже десятков минут, остаются свободные электроны. Электронная эмиссия с металлической поверхности за это время продолжается даже сквозь слой уже образовавшегося оксида (рис. 1.1, *в*). В земной атмосфере при избытке кислорода мономолекулярный слой кислорода на поверхности только что разорванного образца выстраивается за миллиардную долю секунды, при давлении 10^{-6} мм рт. ст. — за 2 с, при давлении 10^{-9} мм рт. ст. — за 30 мин, в космическом вакууме — за 7 лет. Созданная на реальном металле оксидная пленка не остается непроницаемым и мертвым панцирем. Она сама по границе ее с металлом и по границе с окружающей средой весьма длительно живет подвижной электрической жизнью, если даже на нее не воздействуют никакие механические силы. Образовавшийся оксидный слой непрерывно обменивается с металлом электрическими зарядами. Верхний слой металла, на котором образуется оксидная пленка, представляет собой особую физическую систему, поскольку любая механическая обработка создает в этом слое полностью разрушенную и разориентированную кристаллическую структуру. Глубина таких слоев зависит от способа механической обработки: после тонкого шлифования — приблизительно от 2 до 25 мкм, после точения и грубого шлифования — от 75 до 250 мкм, после полирования — от 0,2 до 0,5 мкм. Энергетическая и электрическая пересыщенность таких слоев по сравнению с нормальной структурой металла весьма велика. Это и проявляется в необычайно высокой активности, с какой на такой поверхности возникают оксидные наслоения, с которыми и приходится особенно считаться технологу при различных способах сварки давлением.

Начальные скорости окисления обнаженных металлических поверхностей, как уже указывалось, огромны. Однако по мере увеличения толщины оксидного слоя на холодном металле стабилизируются пленки такой сравнительно небольшой толщины, что металл визуально сохраняет свой характерный металлический блеск. Такие оксидные наслоения благодаря их малой толщине оптически прозрачны. Так, в частности, если говорить о железе, то его металлическая поверхность не теряет своего блеска, пока

Таблица 1.1. Свойства оксидного слоя на железе

Цвет побежалости	Температура возникновения, °С	Приблизительная толщина слоя $\Delta \cdot 10^8$, см
Соломенно-желтый	220—240	450
Оранженый	240—260	500
Красно-фиолетовый	260—280	650
Синий	280—300	700
Окалина	600	5000

толщина оксида не превышает $3 \cdot 10^{-8}$ м. Можно заметить отсюда, что даже самое мелкое зерно, какое может быть в полированном слое (0,2 мкм), в семь раз превышает толщину оптически прозрачного оксидного слоя 0,03 мкм. Разумеется, нагрев металла при его механической обработке может заметно увеличить толщину оксидного слоя. Известно, в частности, что с повышением температуры поверхности на железе появляются цвета побежалости (табл. 1.1).

Электрическая структура оксидов многих металлов чисто полупроводниковая. Наслоения оксида на металлической поверхности имеют более сложную переходную структуру от металлического проводника к полупроводнику. Поверхностный слой разориентированных кристаллов по своей электрической структуре иногда ближе подходит к полупроводникам, чем к металлу.

Рассмотрим геометрические характеристики механически обработанной металлической поверхности. Геометрию металлической поверхности исследуют и изучают в различных масштабах. Если масштаб макроскопический, то поверхность характеризуется степенью ее волнистости. В пределах каждой волны поверхность в зависимости от способа обработки обладает той или иной шероховатостью (рис. 1.2). Шероховатость в технологии машиностроения моделируют в виде различных геометрических фигур. В этой книге шероховатость принято моделировать пирамидами с квадратным основанием (рис. 1.3). Волнистость измеряется обычными инструментами (линейками, штангенциркулями), шероховатость очерчивают особые приборы — профилографы. Одна из типовых профилограмм показана на рис. 1.4. Каждая пирамида построена из множества разрушенных кристаллитов (рис. 1.5) и оказывается насыщенной огромным числом дефектов решетки. В сумме все разрушенные кристаллические организации и являются теми концентраторами избыточной энергии, за счет которой весьма активно оксидируется металлическая поверхность. Структура двойных электрических слоев повторяется и на поверхности оксидных пленок (рис. 1.6). Воздушная среда цеха обеспечивает адгезионные наслоения на оксид водяных, масляных и пылевых частиц, каждая из которых всегда электрически полярна.

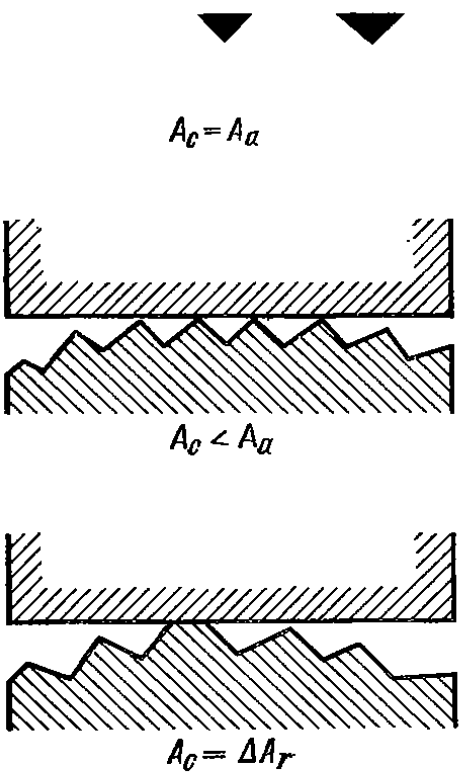


Рис. 1.2. Схема контактирования идеально ровной металлической поверхности с поверхностью волнистой и шероховатой

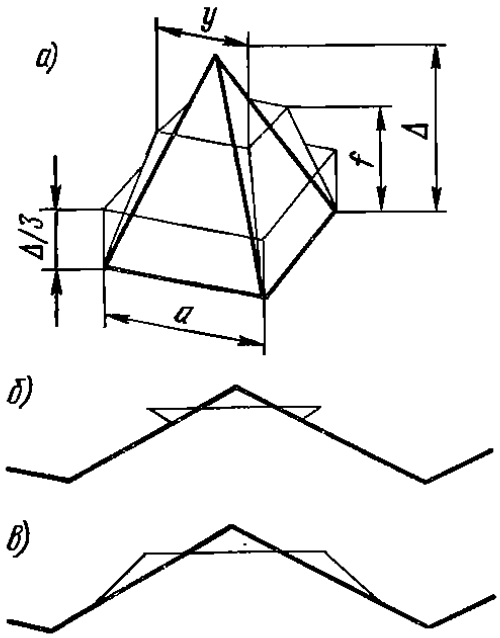


Рис. 1.3. Моделирование шероховатости посредством пирамид с квадратным основанием: *а* — единичный выступ; *б* — схема деформации пирамиды кратковременным ударом по идеальной плоскости; *в* — схема деформации пирамиды статическим давлением

Как видно, металл надежно защищает чистоту своих глубинных слоев. Оксидные и адгезионные наслоения и являются главным препятствием против самопроизвольного сваривания любых металлических поверхностей, образующих контакт. Электрическая связь адгезионных и оксидных наслоений с металлом очень прочна.

Зачистка всех наслоений с поверхности металла практически невозможна никакими химическими, физическими и механиче-

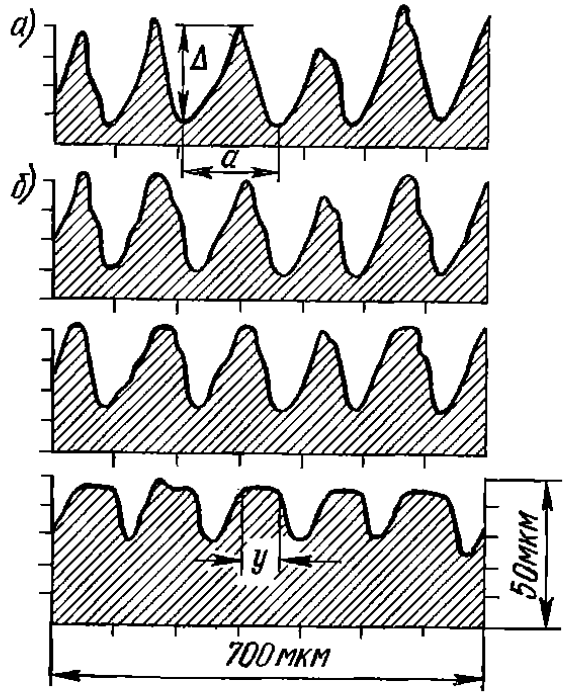


Рис. 1.4. Профилограмма поверхности алюминиевой пластины после зачистки ее наждачной бумагой (*а*) и в результате ее деформации плиткой Иогансона под давлением 20, 100 и 200 МПа (*б*)

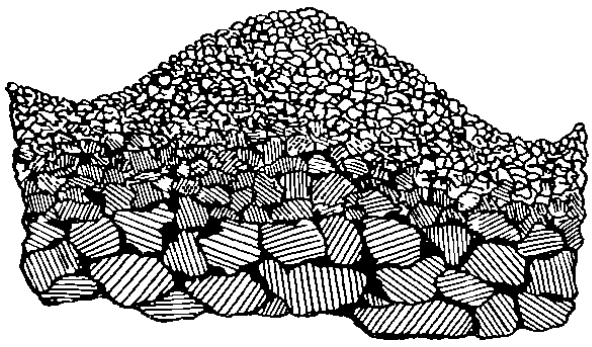


Рис. 1.5. Микроструктура пирамидальной шероховатости

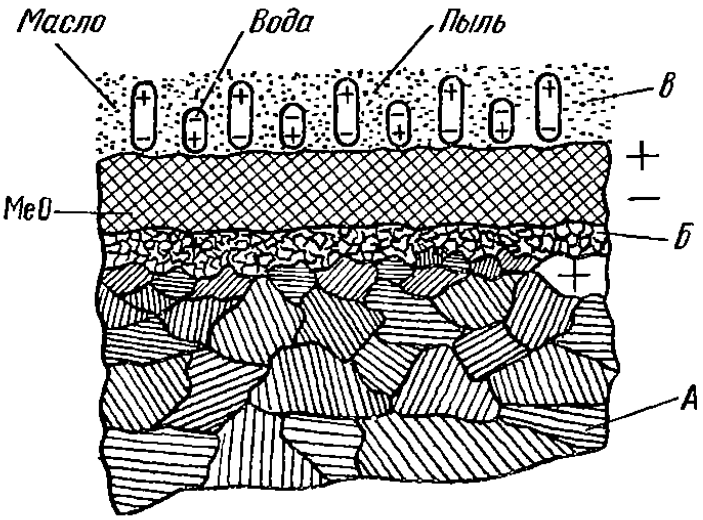


Рис. 1.6. Схема строения слоев на реальной металлической поверхности:

А **— металл глубинных слоев;** ***Б*** **— металлооксидная эвтектика внешнего кристаллического слоя;** ***В*** **— адсорбционные наслоения по оксидному слою (воздух, пары воды, масло, пыль); МеО — оксидный слой (толщина относительно увеличена)**

скими средствами. Всякая, даже самая тщательная, зачистка металлических поверхностей способна только свести к минимальной толщине все оксидные и адсорбционные наслоения на поверхности металла. Контакт двух металлических деталей без промежуточной оксидной и адсорбционной прослойки, т. е. непосредственно контакт между кристаллами может быть обеспечен только в двух случаях:

1) когда контакт осуществляется в космическом вакууме;

2) когда пластическая деформация выдавливает и выносит за пределы плоскости контактирования все оксидные и адсорбционные наслоения.

К последнему, идеальному случаю с различной степенью успеха стремятся все технологические приемы всех процессов сварки давлением.

Что касается процессов сварки плавлением, то здесь все оксидные и другие наслоения просто растворяются в расплавленном металле. Удаление загрязнений металла в одних случаях и растворение этих загрязнений в других — вот в этом и есть одно из самых существенных различий между сваркой давлением и плавлением. Как будет показано в дальнейшем, при современной контактной точечной и шовной сварке соединения образуются по принципам плавления.

На рис. 1.4 представлена картина постепенной деформации выступов шероховатости при сдавливании этих выступов плиткой Иогансона, т. е. почти идеально плоской деталью. Наибольшее давление (200 МПа) значительно превышает предел текучести отожженного алюминия. Тем не менее пирамиды полностью не смялись и не превратились в параллелепипеды. Этот факт объясняется следующими причинами.

Поверхностный слой металла в результате любой механической обработки становится предельно наклепанным, насыщаясь линейными и точечными микродефектами в сотни и тысячи раз больше, чем это характерно для нормального проката. Оксидные прослойки проникают в глубину шероховатостей, создавая своеобразную эвтектику металла с его оксидами (слой *Б* на рис. 1.6). Показатели микротвердости, приведенные в табл. 7 приложения,

определяют, насколько может повыситься микротвердость пирамид в целом, если их структура из чисто металлической превращается в металлооксидную. При значительных давлениях в порах, образующихся между пирамидами, сжимаемый воздух настолько нагревается, что должно произойти энергичное окисление металла, окружающего поры. Этот эффект вызывает еще бо́льшую концентрацию оксидной фазы в металле и соответственно повышает и показатели твердости, и значения удельного электрического сопротивления поверхностного слоя металла. В табл. 7 приложения приведены сравнительные значения удельных электросопротивлений некоторых металлов и их оксидов. Сравнивая эти данные, можно сделать вывод, что и с точки зрения электропроводности шероховатая поверхность металла по своим свойствам может значительно приближаться к полупроводникам.

Учитывая изложенное выше, следует констатировать: в земной атмосфере никакие металлические поверхности не могут быть свободными от оксидных и адсорбционных наслоений. Весь вопрос для сварщиков сводится только к тому, какова структура и толщина этих наслоений. Несмотря на неизбежное наличие поверхностных наслоений, в технологической практике используются термины «чистого металла» в смысле его зачистки перед сваркой. Для контактной сварки визуальная оценка чистоты определяется отсутствием явно видимой окалины или явно видимого потускнения. С этой точки зрения идеальной поверхностью считают холодный прокат, протравленный металл, металл, зачищенный абразивным инструментом и абразивным материалом.

Выше было определено, что главной и даже единственной причиной неизбежных оксидных и адсорбционных наслоений на поверхности металла является факт энергетического неравновесия, энергетического контраста между средой и вновь образовавшейся поверхностью металла в этой среде. Электрическая полярность всех слоев на металле, показанная на рис. 1.6, говорит и об электрической природе всех границ структур, что подтверждается многими измерениями разности потенциалов. Установлено, например, что не только два соседних кристаллита энергетически неравновесны, но даже граница зерна по сравнению с его серединой электрически более отрицательна. Упругие деформации почти не изменяют разности потенциалов между соседними зернами, пластические же сказываются в очень сильной степени. Все надрезы, трещины и другие концентраторы напряжений дают отрицательный потенциал относительно основной массы металла.

Любые соседние контрастные элементы структуры, любые два соседних зерна одной и той же структуры, но разного размера, два различно деформированные зерна обязательно имеют между собой электрическую разность потенциалов как следствие электрической природы строения вещества.

Эти общеизвестные факты почти не используются, к сожалению, металловедами при изучении металлических структур.

Для технологов сварочного производства отмеченные микроэлектрические эффекты существенны, особенно при изучении контактных сопротивлений. Вероятно, существует прямая связь между явлением экзоэлектронной эмиссии и фактом медленного выравнивания разности потенциалов между различно деформированными объемами металла.

Максимум экзоэлектронного выхода наступает через несколько минут после момента пластической деформации. Падение электрического потенциала $U_{ээ}$ от максимума до нуля на холодном контакте во времени от момента контактирования также происходит за минуты (рис. 1.7).

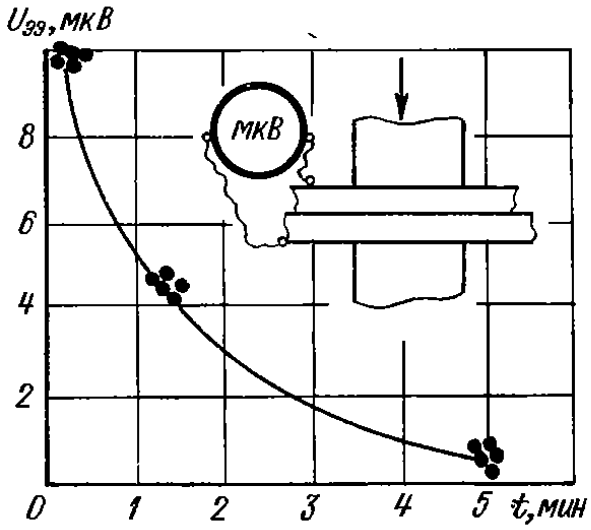


Рис. 1.7. Снижение разности потенциалов $U_{ээ}$, возникшей на контакте после ударного сжатия, во времени

Механическая деформация шероховатостей — это акт некоторой общей для контакта атомно-электронной активации, которая за несколько минут постепенно угасает, создавая равновесную электрическую структуру. Это и фиксируется, в конечном итоге, нулевой разностью потенциалов на холодном контакте. Получается некоторый физический парадокс: механический контакт при своем возникновении оказывается чисто электрическим. Другое дело, что разности потенциалов на нем измеряются микровольтами, что весьма мало по сравнению с теми, что возникают на контакте при прохождении через него сварочного тока. Тем не менее для объяснения электрического пробоя через поверхностные слои на металлических поверхностях в контакте вряд ли следует пренебрегать явлением его своеобразной электризации путем давления. Наиболее достоверно считать, что в плоскости всякого механического контакта в момент его организации за счет энергии пластической деформации образуется структура плазмы, и плазмы безусловно проводящей, если этой проводимости не мешают большие толщины оксидов.

Оксидная пленка на рис. 1.6 показана схематически и увеличенной толщины. Ее сцепление с металлом происходит через промежуточный разориентированный слой оксидно-металлической эвтектики. Наличие такого слоя в плоскости холодного контакта неизбежно при любой толщине оксидной пленки. Рассматривая профилограмму поверхности на рис. 1.4, можно сопоставить относительные размеры пирамид шероховатости и толщины оксидной, оптически прозрачной пленки на пирамидах. Если высота пирамиды приблизительно 50 мкм, а толщина пленки 0,03 мкм, то из рис. 1.4 можно увидеть, что высота пирамиды в тысячи раз больше толщины оксида на ней. Таким образом, макрошлиф реального

холодного контакта свежезачищенных деталей покажет толщину оксидной пленки, разделяющей детали приблизительно такого же размера, как и толщина межкристаллитных границ. Однако структуры этих двух границ категорически различны, так же как различно строение самой пирамиды и внутреннего зерна металла.

Зерна (кристаллиты) составлены из фрагментов, фрагменты — из блоков. Блоки как группа элементарных кристаллов могут быть разориентированы (а не разделены прослойками) относительно друг друга на доли градуса, фрагменты — на несколько градусов. Внутри зерна никаких оксидных загрязнений нет, но зерна отличаются друг от друга не только ориентацией, они отделяются особыми межкристаллитными границами. Эти границы оказываются насыщенными всеми возможными несовершенствами кристаллических решеток. Тем самым межкристаллитные границы представляют собой концентраторы особой энергии, всегда стремящейся к возможной разрядке. Разрядка может происходить в виде высокой химической активности границ по сравнению с серединой зерна.

Общеизвестное явление повышенной скорости травления межзеренных границ для сварщиков-технологов должно быть подчеркнуто особенно. Протравленная межзеренная граница своей чернотой создает впечатление полной разобщенности зерен и тем самым якобы подчеркивает полное отсутствие прочностной связи между ними. В действительности между зернами существует сильнейшая металлическая связь. Зерна посредством больших пластических деформаций могут дробиться на множество более мелких, показывая при травлении свои новые границы. Эти границы при последующей рекристаллизации исчезнут в процессе поглощения одного зерна другим. Новые границы снова будут визуально фиксироваться как черные изолирующие прослойки. Однако эти прослойки никогда не вызывают у исследователя сомнений в прочности металла по межзеренным границам, поскольку известно, что во многих случаях здесь оказывается большая прочность, чем в сердцевине зерна.

Некоторые процессы контактной сварки (особенно микросварки) протекают при температурах ниже точки плавления. При этом достигаются высокие прочностные свойства соединений, но в разрезе соединений на макрошлифах также видна протравленная сплошная чернота по плоскости контакта. Вот эта чернота в сваренном контакте почему-то у многих металловедов вызывает подозрение в непроварах. Можно вполне определенно утверждать, что и по плоскости сваренного контакта визуально заметная граница только потому и оказывается заметной, что здесь в процессе сваривания произошла обильная концентрация микродефектов всех родов. Это вызвало активную химическую реакцию травления, что и зафиксировалось черной прослойкой, видимой на макрошлифе.

1.2. Холодный металлический контакт

Вопросами теории холодных контактов металлических поверхностей задолго до сварщиков занимались технологи машиностроения. В этой области накоплен большой опыт, который и следует позаимствовать для контактной сварки, но если речь идет только о холодном контакте, находящемся под статическим давлением.

Показатели шероховатости после различных видов механической обработки поверхностей представлены в табл. 5 приложения. Здесь же даны значения коэффициентов b и ν, введенные в практику Н. Б. Демкиным и И. В. Крагельским [3].

Как было ранее обусловлено, шероховатость моделируется в виде пирамид с квадратным основанием. Моделирование такого рода безусловно идеализировано, но без систематизации размеров и форм шероховатостей невозможны никакие расчеты и даже качественные выводы. На основании конкретных значений шероховатости можно сделать вывод, что при всех видах обработки пирамиды представляют собой сильно сплюснутые геометрические фигуры: размеры основания в десятки или сотни раз превышают высоту пирамид. Такая форма выступов определяет разную деформационную картину в зависимости от программы приложения действующего давления и температуры пирамиды.

Для ударного давления плоской пластиной по холодной пирамиде она получает деформацию по схеме рис. 1.3, *б*. Нагретая целиком под действием статической или медленно изменяющейся силы пирамида деформируется по схеме рис. 1.3, *в*. Такого рода деформации характерны только для сил, сдавливающих пирамиду от ее вершины точно по оси симметрии. Однако практически почти при всех способах сварки давлением осевое давление сочетается со сдвиговым в какую-либо сторону. Мало того, и чисто осевое давление в свариваемом контакте как в отдельных микропирамидах, так и по всей плоскости контакта всегда завершается сдвиговым эффектом. Как будет показано в дальнейшем, этот эффект является самым главным фактором формирования сварного соединения вообще.

Для равномерной осевой деформации при полном смятии пирамида превращается в параллелепипед. Частичная деформация создает идеализированную усеченную пирамиду. Единичную площадь контакта смятой пирамиды y^2 принято обозначать так:

$$y^2 = \Delta A_r. \qquad (1.1)$$

В плоскости реального металлического контакта (рис. 1.8) может образоваться n таких площадок. Если считать все ΔA_r одинаковыми, то в сумме они составят так называемую фактическую площадь контакта

$$A_r = n\Delta A_r. \qquad (1.2)$$

Фактическая площадь контакта — это в значительной мере показатель поверхностной шероховатости, но не только. Чис-

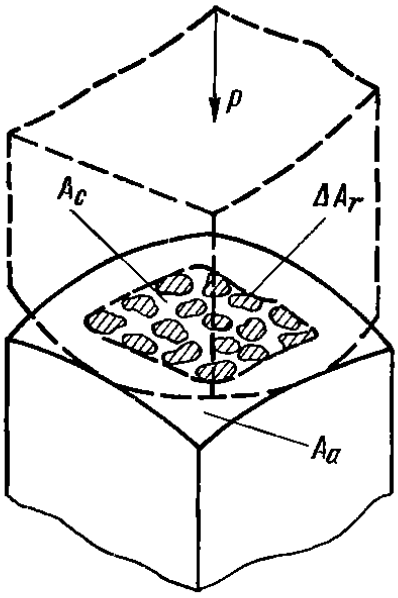


Рис. 1.8. Схематическое изображение стыкового механического контакта волнистой и шероховатой поверхностей

ло элементарных площадок n определяется и волнистостью контактируемых деталей (см. рис. 1.2). В связи с этим введено понятие контурной площади контакта. Эту площадь обозначают A_c и ее размер определяют теми границами, в пределах которых вписываются все элементарные площади контакта ΔA_r.

Размер площади сечения всей свариваемой детали, или размер предельно возможной площади контактирования деталей, называют номинальной площадью контакта и обозначают символом A_a.

В технологии машиностроения принято определять относительную деформацию единичной пирамиды следующим образом (см. рис. 1.3):

$$\varepsilon = \frac{\Delta - f}{\Delta} = 1 - \frac{f}{\Delta}; \quad f = \Delta(1 - \varepsilon). \tag{1.3); (1.4}$$

Относительную деформацию группы микропирамид, составляющих фактическую площадь контакта, согласно экспериментальным данным Н. Б. Демкина [3], принято вычислять так:

$$\varepsilon = [p/(p_{с.д} b)]^{1/\nu}. \tag{1.5}$$

В этой формуле коэффициенты b и ν характеризуют деформационную способность шероховатой поверхности чисто геометрически, без учета способа обработки поверхности ее физического состояния; p — давление, усредненное по контурной площади контакта; $p_{с.д}$ — сопротивление деформации микропирамид, это показатель в значительной степени неопределенный, его величина зависит от способа обработки поверхности металла и энергии, с какой это делалось.

В технологии машиностроения величину $p_{с.д}$ для всех видов станочной обработки рекомендуют принимать, в среднем, равной тройному пределу текучести металла

$$p_{с.д} = 3\sigma_т. \tag{1.6}$$

Опыт показал, что для свариваемых контактов при точечной и стыковой сварке это соотношение дает удовлетворительные результаты при расчетах площадей контактирования.

Контактные площади определяются критериальным числом [7]

$$Z = \alpha \frac{p\theta}{p_{с.д}\theta_{пл}}, \tag{1.7}$$

где θ — температура металла в зоне контактирования; $\theta_{пл}$ — температура плавления.

Контурная площадь контакта определяется [7] в зависимости от критерия деформационного подобия Z по формуле

$$A_c = A_a\left(1 - e^{-Z}\right). \quad (1.8)$$

При $Z \approx 4A_c \approx A_a$ в холодном контакте при $\theta = \theta_{хол}$ такое равенство может наступить при $p = p_{с.д}$.

Тогда, приравнивая

$$Z = 4 = \alpha \frac{1\theta_{хол}}{\theta_{пл}},$$

определяем коэффициент

$$\alpha = 4\theta_{пл}/\theta_{хол}. \quad (1.9)$$

Подставляя его в формулу (1.7), получаем значение критерия Z как для холодного, так и для горячего контактов

$$Z = 4p\theta/(p_{с.д}\theta_{хол}), \quad (1.10)$$

где $\theta_{хол}$ — комнатная температура, равная примерно 300 К; θ — температура горячего металла в зоне контактирования. Значение $p_{с.д}$ можно принимать по соотношению (1.6), т. е. равным тройному пределу текучести.

Если контурная площадь под действием давления и нагрева стремится в пределе к номинальной, то, видимо, фактическая площадь имеет своим пределом контурную. Закономерность изменения фактической площади под действием давления и нагрева, очевидно, также должна определяться критериальным числом, аналогичным Z. В [7] он был обозначен символом X и определен следующими соотношениями:

для грубообработанных поверхностей, когда значение показателя степени в формуле (1.5) принимается равным двум (см. табл. 5 приложения), критерий X равен

$$X_{\nu=2} = \theta_\Delta p/(2\theta_{хол}\sigma_\text{в}b); \quad (1.11)$$

для тонкой (чистой) обработки при $\nu = 3$

$$X_{\nu=3} = \theta_\Delta p/(\theta_{хол}\sigma_т b). \quad (1.12)$$

Для холодных контактов, когда температуру выступа можно считать $\theta_\Delta = \theta_{хол}$, эти формулы соответственно принимают вид:

$$X_{\nu=2} = p/(\sigma_\text{в}2b); \quad X_{\nu=3} = p/(\sigma_т b), \quad (1.13); \quad (1.14)$$

где $\sigma_т$ — предел текучести металла в предельно наклепанном состоянии (при деформации 80—90 %). Коэффициент b приведен в табл. 5 приложения.

Фактическую площадь контакта определяют по формуле

$$A_г = A_c\left(1 - e^{-X}\right). \quad (1.15)$$

Формулы (1.11)—(1.15) полностью достоверны для машиностроительных контактов, в которых все деформационные, струк-

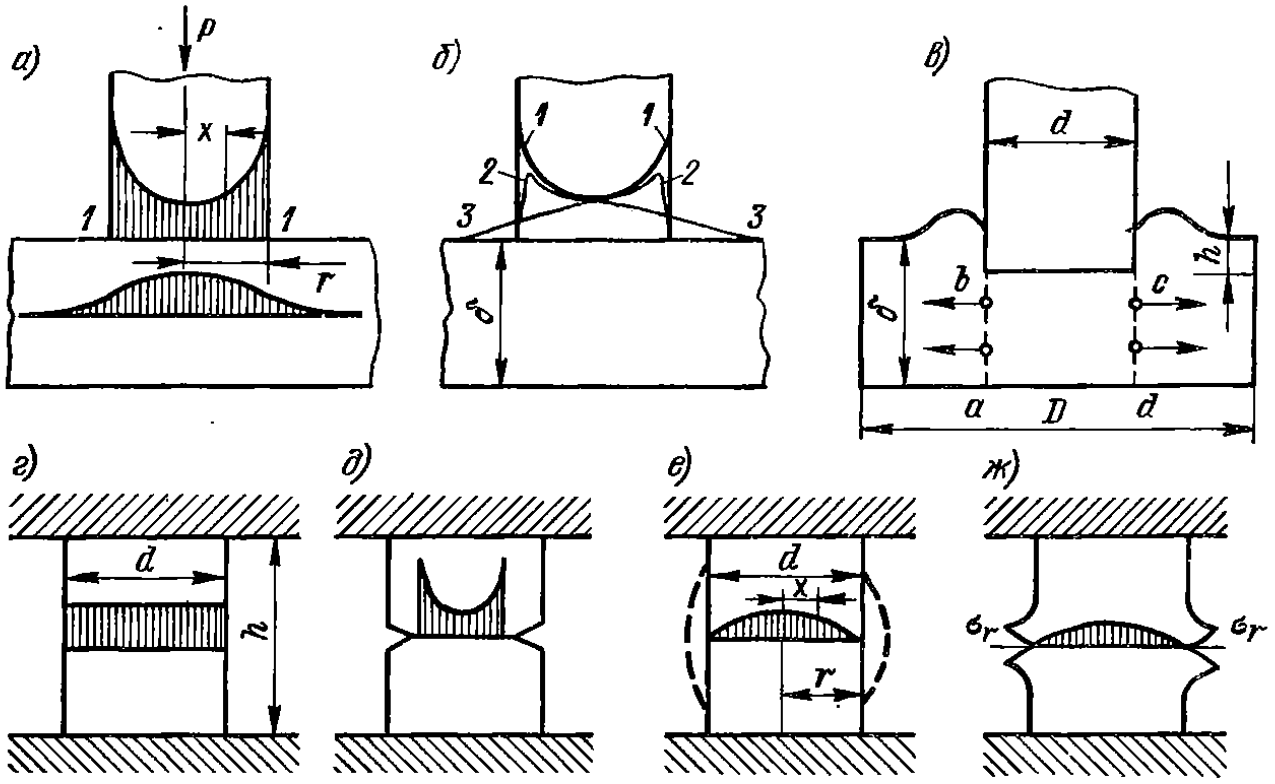


Рис. 1.9. Схемы распределения напряжений по плоскости контактирования в статических механических контактах

турные и, следовательно, электрические микропроцессы успокоились и стабилизировались. Для свариваемых контактов в моменты их образования определение площади весьма затруднительно, особенно при действии ударных сдавливающих сил. Для такого рода нагрузок на контакт значения величин $p_{с.д}$, $\sigma_т$, входящих в структуру критериев Z и X, могут заметно различаться в зависимости от программы приложения давления, действующего на контакт и, следовательно, в зависимости от мгновенной концентрации энергии в плоскости контакта.

Вопросам концентраций и распределения действующих механических напряжений посвящено много литературы. Для условий контактной и некоторых других процессов сварки давлением схемы силового взаимодействия представляют значительный интерес.

На рис. 1.9 показаны эпюры распределения механических напряжений по плоскостям контактирования и плоскостям резкого изменения сечений.

Для практических расчетов принимают, что под абсолютно жестким пуансоном (рис. 1.9, *а*) абсолютно жесткая плита равномерно нагружается силой P, т. е. полагают, что

$$p = P/(\pi r^2).$$

В действительности распределение давления происходит по закону

$$p_r = \frac{1}{2}\frac{P}{\pi r^2}\frac{1}{\sqrt{1 - x^2/r^2}}. \qquad (1.16)$$

Формула (1.16) дает теоретически бесконечно большие значения давления по образующей цилиндрического пуансона. Практически идеально жесткого пуансона не бывает, так же как не бывает пуансона хотя бы без самых малых закруглений по краю опорного круга *1—1* (рис. 1.9, *а*). При наличии таких закруглений кривая распределения давлений также превращается в закругленную: кривая *2—2* (рис. 1.9, *б*). Если плита сама оказывается к к тому же не абсолютно жесткой, а обладает пластичностью, то кривая давлений резко меняет свое очертание, превращаясь в кривую *3—3*. По этим кривым, в согласии с формулой (1.16), видно, что в центре, по осевой линии пуансона, во всех случаях действует давление

$$p_{\text{п}} = 0{,}5P/(\pi r^2) \qquad (1.17)$$

или несколько меньшее этой величины. На рис. 1.9, *в* показано внедрение пуансона в металл (прошивка металла). Стрелки показывают течение слоев металла радиально осевой линии пуансона. Для определения действительных напряжений в металле при деформировании по схеме рис. 1.9, *в* существует известная формула Е. П. Унксова

$$\sigma = \sigma_{\text{т}} \left[1 + \frac{d}{6(\delta - h)} + \ln \frac{D}{d} \right]. \qquad (1.18)$$

Как видно из формулы (1.18), для прошивки металлической болванки толщиной δ и диаметром D необходимо создать напряжения сжатия, превышающие предел текучести на некоторый коэффициент (приведен в квадратных скобках), зависящий от размеров заготовки и глубины проникновения пуансона. Первые два члена этого коэффициента показывают, какие должны быть приложены давления, чтобы деформировать цилиндрическую заготовку *abcd* (рис. 1.9, *в*) без окружающей ее массы металла. Вторая часть коэффициента, $\ln (D/d)$, определяет увеличение доли тех напряжений, которые действуют радиально, вызывая распор металла.

Рассмотрим некоторые схемы пластической деформации при стыковом контакте.

Если сжатию подвергается целый стержень из жесткого, непластичного металла, то никаких пластнческих деформаций нет, и эпюра действующих напряженнй сжатия представляется в виде равномерно распределенной нагрузки (рис. 1.9, *г*). Если на стержне из такого же жесткого материала сделан кольцевой вырез (или два идеально подогнанные друг к другу по плоскости контакта стержня, которые по краю не соприкасаются) (рис. 1.9, *д*), то у вершины выреза концентрируются пиковые напряжения. Если целый стержень из пластического металла деформируется между двумя плитами, в которых он жестко закреплен (абсолютное трение), то распределение напряжений сжатия представляется эпюрой, изоб-

раженной на рис. 1.9, *е*. Уравнение этой кривой определяется формулой

$$\sigma_x = \frac{3}{2}\frac{P}{\pi r^2}\sqrt{1-\frac{x^2}{r^2}}. \qquad (1.19)$$

При стыковой сварке двух стержней (рис. 1.9, *ж*) эпюра действующих давлений на практике оказывается более сложной, чем для целого стержня (рис. 1.9, *е*). При значительных деформациях с небольшими скоростями по краям свариваемого контакта появляются напряжения σ_r обратного знака, разрывающие металл (рис. 1.9, *ж*).

Рассмотренные модели позволяют сделать заключение о том, что в свариваемых контактах только в редких случаях получается равномерное распределение напряжений сжатия. Неравномерность распределения этих напряжений определяется и формой деталей, и механическими свойствами металла при температурах сваривания. Все рекомендуемые в литературе нормы для величин таких напряжений исходят из условий не только равномерного распределения напряжений, но и равенства приложенных напряжений пределу текучести металла.

Теория пластических деформаций показывает, что средние действующие напряжения сжатия, при которых металл течет, определяются равенством

$$\sigma = \sigma_т\left(1+\frac{2}{3}\frac{S}{uh}\right), \qquad (1.20)$$

где S — площадь сечения сжимаемой детали; u — периметр сечения; h — высота заготовки (расстояние между зажимными губками).

Для круглых заготовок формула (1.20) принимает вид

$$\sigma = \sigma_т\,(1 + d/(6h)). \qquad (1.21)$$

О зависимости такого рода уже говорилось при рассмотрении модели, показанной на рис. 1.9, *в*. В связи с этим формулы полезно сравнить (1.21) и (1.18).

Все приведенные выше формулы, относящиеся к деформационным напряжениям и их концентрациям, справедливы только для статических нагрузок или нагрузок, прикладываемых с малыми скоростями. Для ударных же давлений все общепринятые показатели механических свойств металла недостоверны. При каждом способе сварки давлением деформационные картины в контакте различны. При сварке взрывом момент образования контакта и момент его сваривания по времени неразличимы. Поведение металла в контакте при холодной сварке и трением — это течение металлических слоев под давлением, а не стабильное соприкосновение поверхностей. Для этих способов сварки представления о контакте, принятые в машиностроении, не применимы. Богатый

теоретический и экспериментальный материал, накопленный в технологии машиностроения, может быть использован для приближенных расчетов только при контактной точечной и рельефной сварке.

1.3. Физическая сущность активации свариваемых контактов

Активация контакта — это процесс преднамеренного повышения энергии в поверхностных слоях или по плоскости контакта, или, плюс к этому, в некотором объеме металла вокруг контакта. Конечная цель активации — создание сварного соединения. Активирование металла может производиться как в микро-, так и в макрообъемах. Энергия активации может быть получена за счет любого физического процесса, ограничением обычно служит технологическая целесообразность.

Для сваривания энергию, вводимую в контакт, программируют весьма разнообразно. Поскольку программирование энергии — это количественное изменение ее во времени, то можно сравнивать инерционности приложения каждого вида энергии. С этой точки зрения механическая энергия, вводимая в свариваемый контакт для его активации, весьма универсальна и безынерционна по сравнению с энергией тепловой. Если иметь в виду электрическую природу строения вещества вообще и металла в частности, то можно говорить, что всякая активация контакта — это активация внутренней электрической структуры металла. На первый взгляд поэтому кажется, что механическая энергия, по закону термодинамики, способна непосредственно превращаться только в энергию тепловую. И как будто бы только сама электрическая энергия способна электрически активировать металл. В действительности это не так. Механическая энергия — это отличный активатор внутренних электрических процессов в свариваемом контакте в частности, а в металле — и вообще во всем объеме.

На рис. 1.10 дана экспериментальная кривая, показывающая термоэлектродвижущую силу $U_{тэ}$ отожженных и деформированных кристаллитов железа, измеренную через длительный промежуток времени после деформации. Такая стабилизированная картина устанавливается через несколько минут с момента деформации. В начальный же момент значение этой термо-э. д. с. превышает стабили-

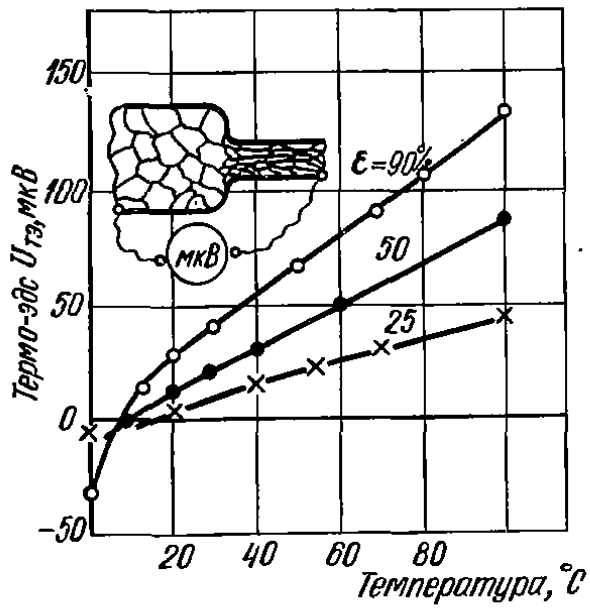


Рис. 1.10. Зависимость термоэлектродвижущей силы $U_{тэ}$ отожженных и пластически деформированных кристаллитов железа при различной степени деформации ε от температуры

зированное в 10—15 раз. Такое или даже большее превышение определяется скоростью деформации, которая может обеспечить и весьма ощутимое повышение температуры зоны контакта. Таким образом, механическая активация свариваемого контакта обеспечивает в нем не только развитие теплового, очень привычного нам эффекта, но и одновременно создает явно электрические процессы. Однако сварщики не должны пренебрегать электротепловыми эффектами в свариваемых соединениях. Их признание весьма заметно поможет более глубоко и достоверно понимать физическую сущность металлического контактирования вообще. Каждый процесс сварки давлением завершается операцией сдавливания — операцией осадки. Все процессы сварки давлением отличаются друг от друга временной программой операций осадки. Эти операции могут быть:

1) длительно действующими при постоянном давлении; это соответствует процессу диффузионной сварки;

2) ударно-импульсными — характерными для сварки взрывом и магнитно-импульсной сварки;

3) специально программированными, т. е. переменными по силе сдавливания и времени действия этой силы. К этой области относятся, по сути дела, все процессы сварки давлением, имеющие наибольшее применение в современной технике: контактная, холодная, трением, ультразвуковая и даже диффузионная. Ультразвуковая представляет собой способ сварки с наиболее сложной временной программой приложения давления, сочетая ударно-импульсное действие с переменной во времени силой удара.

Каждый процесс сварки давлением может обеспечить высокие качества соединения при соблюдении только двух обязательных условий.

I у с л о в и е: или все оксидные и адсорбционные наслоения в плоскости свариваемого контакта в процессе плавления контакта растворяются в расплаве;

II у с л о в и е: или все оксидные и адсорбционные наслоения полностью выдавливаются из плоскости свариваемого контакта при операции осадки.

Вакуумирование свариваемого контакта, даже весьма высокое, не может полностью освободить поверхность металла от оксидных и адсорбционных загрязнений.

Условие I полностью соблюдается при контактной точечной и шовной сварке; условие II выполняется для всех остальных процессов сварки: контактной стыковой, трением, холодной, ультразвуковой.

Особый характер имеет очистка плоскости свариваемого контакта при сварке взрывом. При ней свариваемые поверхности очищаются воздушно-плазменной кумулятивной струей.

Как видно из изложенного выше, для основных процессов сварки — контактной стыковой, трением, холодной и ультразвуковой — представляется весьма существенным выяснить физиче-

скую сущность операции сдавливания как главной операции, завершающей формирование сварного соединения. При этом в первую очередь следует подчеркнуть, что сваривание может свершиться только в результате пластической деформации и уж никак не упругой. На основании этого можно утверждать: в зависимости от величины сдавливающей силы и от программы ее действия в плоскости контакта могут происходить процессы межкристаллического разрыва; межкристаллического сдвига; всестороннего сжатия кристаллов. Эти процессы могут происходить в любой комбинации друг с другом, каждый по отдельности и даже все вместе взятые одновременно в любом соотношении.

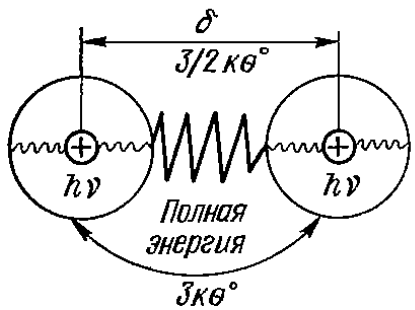


Рис. 1.11. Энергетическая модель двух связанных атомов

Для того чтобы хотя бы весьма приближенно оценить количественно межкристаллические пластические деформации, рассмотрим некоторые достоверные модели. Постараемся при этом возможно более строго разграничивать понятия масштабов. В частности, если вести речь о действиях в масштабе элементарных кристаллов, то уже не делать попытки использовать для них константы, известные для макроскопических объемов металла. Это касается не только физических, электрических, механических, но и других констант. Это, к сожалению, касается даже целых понятий, таких, например, как «температура».

Физически точное определение этого понятия формулируется так: *температура — это мера энергии массы движущихся частиц.* При этом, вообще говоря, безразлично, о каком движении идет речь — поступательном или колебательном относительно точки равновесного состояния.

Как видно, понятия «температура» и «энергия» неразделимы. Они и в самом деле неразделимы, даже и в микрообъемах. Допустим, у нас речь идет всего о двух связанных друг с другом атомах кристаллической решетки. Эту модель можно представить в виде схемы, приведенной на рис. 1.11. Собственные гармонические колебания атома относительно точки равновесия — это энергия потенциальная, равная

$$E_{\text{пот}} = h\nu, \tag{1.22}$$

где h — постоянная Планка, равная $6{,}62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; ν — частота колебаний.

Кинетическая энергия атома в целом

$$E_{\text{кин}} = k\theta, \tag{1.23}$$

где k — постоянная Больцмана; θ — абсолютная температура пространства, в котором расположены атомы или, точнее, это тот самый показатель, который определяет кинетическую энергию

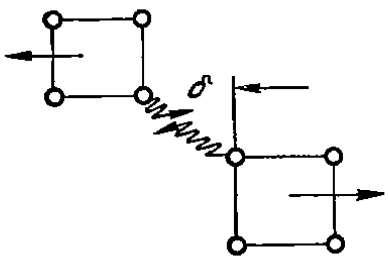


Рис. 1.12. Модель сдвига двух элементарных кристаллов относительно друг друга на параметр решетки δ

одной частицы и который для n частиц привыкли называть температурой.

Полная энергия системы равна сумме кинетической и потенциальной энергии при трех степенях свободы

$$E = E_{\text{пот}} + E_{\text{кин}} = 3k\theta, \qquad (1.24)$$

поскольку $E_{\text{пот}} = E_{\text{кин}}$.

Модель, показанная на рис. 1.11, для условий холодного металла представляет собой равновесную систему со стабильным расстоянием между центрами шаровых моделей атомов. Это параметр кристаллической решетки δ. Что будет происходить при изменениях этого расстояния, можно выяснить исходя из следующих соображений.

По образной терминологии Я. И. Френкеля, в холодном металле атом находится в состоянии «оседлой» жизни. Если же сообщить ему импульс тепловой энергии, характерный для плавления кристалла, то атом способен мгновенно (снова по образной терминологии Я. И. Френкеля) «совершить прыжок» в соседнюю вакансию, проделав тем самым путь, равный параметру решетки δ. Но ведь можно, следовательно, рассуждать и обратным путем: если мы смогли какой-то силой переместить атом из его стабильного положения на такое расстояние δ, значит обязательно тем самым сообщили кристаллу энергию, эквивалентную энергии плавления. А эта энергия совсем необязательно должна быть тепловой, она может быть и электрической, и, что самое интересное, — механической.

«Прыжок» атома в соседнюю вакансию совершается, разумеется, уже не с той «холодной» частотой, с какой он пребывал в состоянии равновесия, а с той мгновенно высокой, какая характерна для частоты плавления. Но как только атом «оседлает» вакансию, он мгновенно отдает избыточный импульс колебательной энергии в пространство, т. е. соседним атомам, и система успокаивается, снова на низкой частоте холодного металла. Таким образом, если сдвинуть (рис. 1.12) один целый кристалл относительно другого на единичный параметр δ, то эта операция будет эквивалентна энергии плавления, но в объеме, занимаемом только этими двумя кристаллами. Все остальные кристаллические «соседи» вокруг этих двух сдвинутых почувствовали этот сдвиг только как факт звуковой затухающей волны. В этом и заключается особенность высокоэнергетического процесса в микромасштабе: механической силой был создан элементарный сдвиг, не разрушивший целостность кристаллической связи и совершенно не замеченный большой массой металла. Тем не менее мгновенная энергетическая вспышка в двух элементарных кристаллах эквивалентна акту их плавления. Эту формулировку полезно запомнить для дальнейшего понимания операции осадочного давления при сварке давлением.

С изменением межатомного расстояния δ связаны еще и следующие процессы. Так, в частности, известно, что при всестороннем сжатии кристалла, когда удается уменьшить его параметр только на одиу четверть, на такой эффект затрачивается энергия, равная энергии плавления. С учетом этого на рис. 1.13 построена кривая изменения энергии кристалла в зависимости от изменения расстояния между его частицами. Точка *1* соответствует энергии холодного металла, для которого и измерены расстояния δ. Сдвиг атома до точки *2* создает разрыв связи и это соответствует энергии плавления $E_{пл}$. Вся правая часть энергетической кривой от точки *1* показывает изменение энергии кристалла при деформациях сдвига. При этом, если сдвиг от точки *1* до точки *2* дает атомный прыжок в соседнюю вакансию, и это является случаем пластической деформации, то движение атома от точки *1* к *4* обратимо и характерно для упругих деформаций. То же происходит и при сжатии, когда атом смещается в точку *3* и также с увеличением энергии. Разумеется, не следует забывать, что деформации кристалла— это одновременно и деформация внешних орбит свободных электронов. Схематически такую деформационную картину можно представить с помощью рис. 1.14, на котором изображена энергетическая кривая свободных электронов.

Расстояние r_0 соответствует размеру электронной оболочки невозбужденного атома, т. е. не подверженного пока никакой активации. Но вот кристалл подвергнут растяжению силой F. Здесь прежде всего следует отметить существенную разницу между параметром решетки δ и расстоянием r_0. Связь друг с другом частиц кристаллической решетки иногда справедливо моделируют в виде

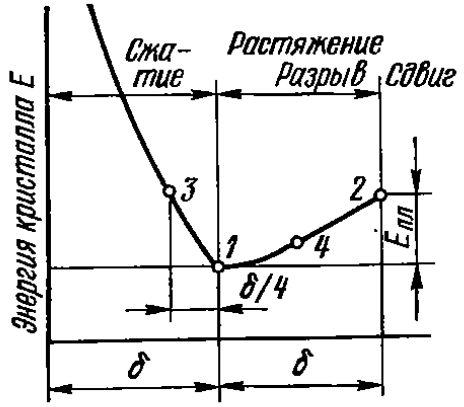
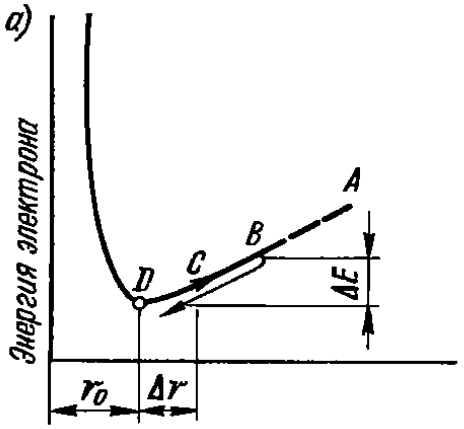


Рис. 1.13. Измененне энергии кристалла в завнсимости от расстояния между атомами



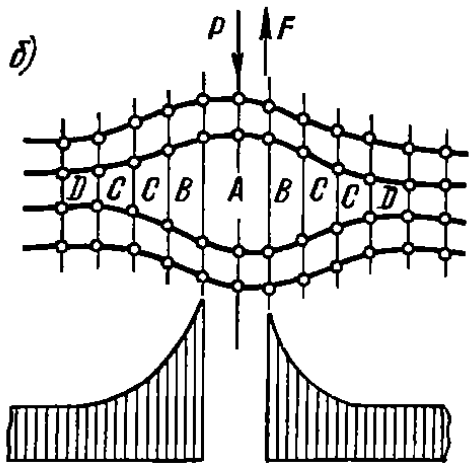


Рис. 1.14. Схема изменения энергии электрона в завнсимости от деформации электронной орбиты (*а*) и схема концентрации электрических и механических сил дефекта (*б*)

пружии, которые при отклоиеиии от своего равновесного состояния сопротивляются и сжатию, и растяжению, возвращаясь в исходное состояние, если деформации были в пределах упругости, и разламываясь, разрываясь, если деформации были пластическими.

Никаких разрывов электронных конфигураций не наблюдается. Эти конфигурации подвижны и непрерывно обеспечивают или мгновенные, или даже длительные равновесные электрические состояния всех зон деформируемого металла. Электроны в атомах при этом непрерывно меняют и свои орбиты, и свои частоты, а каждый переход с одной орбиты на другую сопровождается или поглощением прилагаемой энергии, или ее излучением в пространство.

При любом изменении стабильного радиуса r_0 (рис. 1.14, *а*) на Δr электрон или поглощает энергию, или излучает. Электрон может, однако, и уйти далеко от равновесного расстояния r_0, если ему передана достаточная энергия. При сообщении ему энергии, равной или большей работы выхода, такие электроны могут в зоне разорванных кристаллов *A* создать облако отрицательного заряда, компенсирующего положительный потенциал разъединенных кристаллов.

Рассматривая рис. 1.14, *б*, можно дать некоторое физическое объяснение явлению концентрации механических напряжений сжатия или растяжения относительно трещины, надреза или даже постороннего включения в исследуемом контакте.

Зона *D* соответствует ненапряженному участку металла и стабильному радиусу максимума электронной конфигурации свободных электронов r_0. Зоны *B* и *C* — зоны упругих напряжений, зона *A* — это разрыв металлической связи. Если измерять действующие силы связи как действующие локальные напряжения, то в зонах *B* они особенно велики и не зависят от того, является ли действующая сила растягивающей *F* или сдавливающей *P*. Независимо от знака деформации свободные электроны мгновенно перераспределились и создали временную равновесную электрическую структуру в зонах *B* и *C*.

Каждое движение атома — это одновременно и движение связанных с ним свободных электронов, поскольку только такое совместное движение обеспечивает сохранение электрической нейтральности. Но вот представим себе поверхность, которую механически деформируем и нагреваем. Такая поверхность обеспечивает, очевидно, выброс в пространство свободных электронов за счет одновременно и термоэлектронной и экзоэлектронной эмиссий. Значительная убыль свободных электронов в пространство над кристаллом весьма снижает отрицательный потенциал внутри кристалла. Положительно заряженные частицы кристаллической решетки начинают друг друга взаимно отталкивать и выталкивать из кристалла, а если уход массы свободных электронов происходит быстро, то это может привести к взрыву кристалла. Если оценить энергетические характеристики этого эффекта, то такого рода разрушение кристалла далеко выходит за пределы понятия плав-

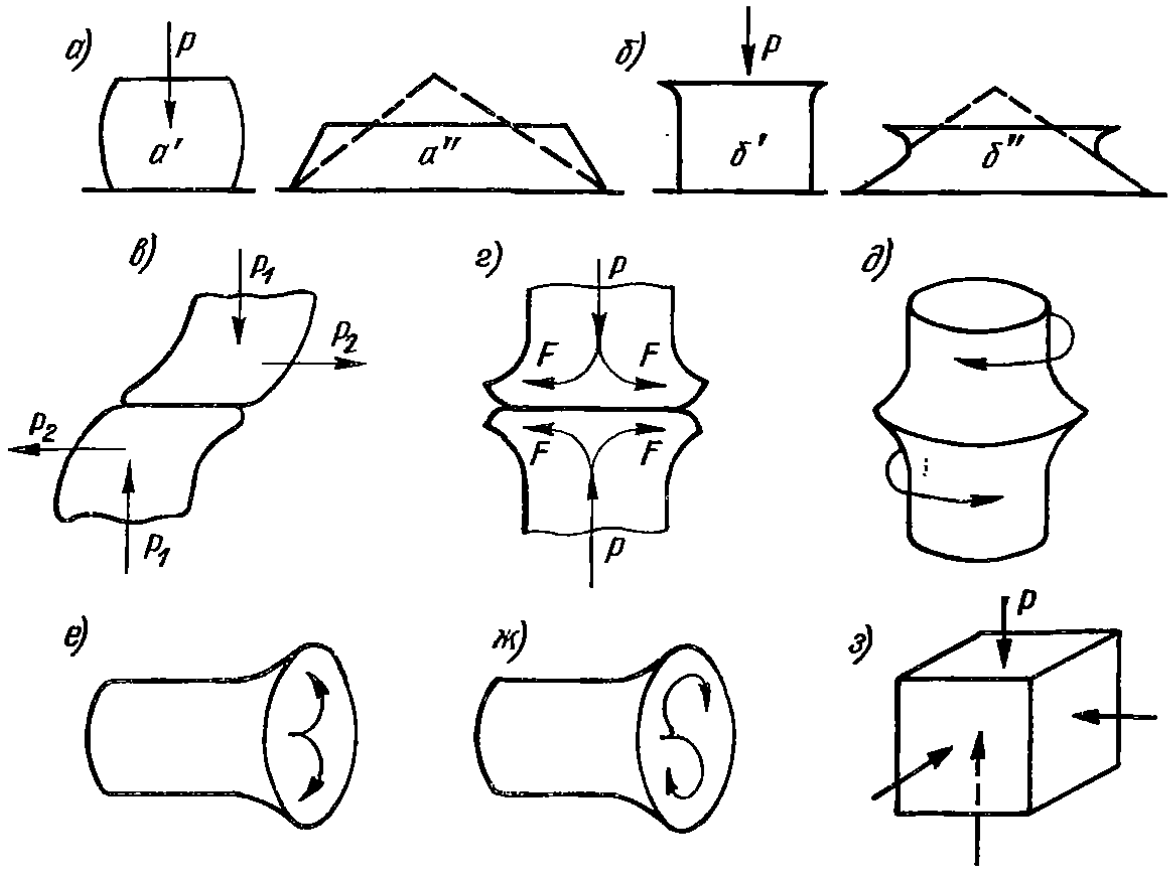


Рис. 1.15. Модели деформирования деталей в области контактов посредством сжатия и сдвига: *а* — медленная (статическая) деформация: для цилиндра — *а'*, для выступа — *а''*; *б* — ударная: для цилиндра — *б'*, для микровыступа — *б''*; *в* — чистый сдвиг; *г*, *д* — сжатие, переходящее в сдвиг; *е*, *ж* — сжатие и сдвиг при сварке трением; *з* — всестороннее сжатие

ления. Однако эти процессы «плавления» или даже «кипения» могут быть и не замечены любой термопарой. И не только термопарой. Атомные осколки разрушенных кристаллов мгновенно, вслед за разрушениями, строят новые, обычно дефектные кристаллы. И это происходит по плоскости контакта и иногда в объеме только нескольких кристаллических слоев, что совсем не мешает называть это микродефектное строительство свариванием. Какой бы ни возник по плоскости контакта атомно-электронный беспорядок, он обязательно после прохождения энергетического максимума превратится в металлическую связь, не только не уступающую связи межкристаллитной, но по прочности даже превосходящую ее. Тот факт, что каждый процесс сварки давлением заканчивается плоским сдвигом, становится ясным из рассмотрения энергетической кривой, показанной на рис. 1.13, и технологических схем, приведенных на рис. 1.15. Деформации растяжения и сдвига (см. правую часть рис. 1.13) идут при значительно меньших затратах энергии, чем всестороннее сжатие. Вполне естественно поэтому, что сила сжатия P (рис. 1.15) при всех способах сварки давлением обязательно превращается по плоскости свариваемого контакта в силу сдвига F. Это превращение всегда оказывается самым последним эффектом при формировании сварного соединения. Межзеренный и межкристаллический сдвиг по плоскости контакта,

деформация сдвига металла вокруг плоскости контакта — вот чем заканчивается каждый процесс сварки давлением.

Произведем некоторые расчеты. Если на какой-то объем металла действует сила сжатия P и деформирует этот объем на размер h, то механическая энергия Ph (Дж), по первому закону термодинамики, за счет внутреннего трения в металле неизбежно перейдет в энергию тепловую. Это бесспорное положение можно записать в виде

$$Ph = Ve\,(d\varepsilon/dt)\,\eta = \gamma cVT, \qquad (1.25)$$

где V — деформируемый объем; ε — относительная деформация; $d\varepsilon/dt$ — скорость деформации; η — коэффициент пропорциональности; γcVT — подъем теплосодержания деформируемого объема.

Поскольку сила $P = pS$, то

$$p = \eta\varepsilon^2/(2t) = \gamma cT. \qquad (1.26)$$

Как видно по единице физической величины, η (Дж/с)/см^3 — это динамическая вязкость или (по другой терминологии) внутреннее трение. Эта характеристика часто используется и ее численные значения определены для многих веществ, в том числе и металлов, но только для жидкого или даже парообразного состояния. Для металлов в твердом состоянии опытных значений коэффициента η нет. Определим эту характеристику расчетным путем, используя для этой цели принцип механического подобия.

Соотношение (1.25) может быть отнесено к любому как макро-, так и микроскопическому объему. Существуют и механические понятия, которые можно использовать как в отношении макроскопических моделей, так и микроскопических. Например, энергию пружины (Дж) определяем так:

$$E_{\text{пр}} = D\delta^2/2, \qquad (1.27)$$

где D — жесткость пружины; δ — ее деформация.

Упругопружинными свойствами обладает и любая кристаллическая система. Ее потенциальную энергию (Дж) можно также определить, если вместо константы жесткости D использовать другую константу, которая пригодна для любой кристаллической организации независимо от ее объема. Такой константой, согласно (1.26), является динамическая вязкость. Приравнивая энергии из формул (1.26) и (1.27)

$$\frac{\eta\varepsilon^2}{2t}\,\delta^3 = \frac{D\delta^2}{2},$$

получаем

$$D = \eta\varepsilon^2\delta/t. \qquad (1.28)$$

Пружинная энергия кристаллов при их деформации и сдвиге превращается в потеициальную

$$E_{\text{пот}} = h\nu.$$

Из равенства формул (1.27) и (1.22), заменяя константу D константой η, по формуле (1.28) находим

$$\eta = 2h\nu t/(\varepsilon^2\delta^3). \qquad (1.29)$$

Если в этой формуле δ — параметр кристаллической решетки; ε — относительная деформация, равная единице при сдвиге на один параметр решетки δ; время t тоже полагать равным единице, то при ν (частоте колебаний атомов холодного металла), значение динамической вязкости η может быть вычислено по табл. 1.2.

В качестве примера можно привести расчет для меди:

$$\eta = \frac{2\cdot 6{,}62\cdot 1{,}5\cdot 10^{13}\,(10^8)^3\cdot 1}{10^{34}\,(2{,}55)^3} = 1200 \text{ (Дж}\cdot\text{с)/см}^3.$$

Расчетная формула (1.29) может быть выведена и из других соображений, относящихся непосредственно к деформации сдвига кристаллов.

Если для сдвига кубического кристалла на один параметр решетки необходима сила P, то энергия сдвига

$$P\delta = p\delta^2\delta = p\delta^3.$$

Эта энергия превращается в потенциальную $h\nu$, т. е.

$$p\delta^3 = h\nu.$$

Подставляя сюда значение p, получаем

$$\frac{\eta\varepsilon^2}{2t}\delta^3 = h\nu.$$

И, соответственно, динамическая вязкость определяется, как и было записано выше, по формуле (1.29)

$$\eta = 2h\nu t/(\delta^3\varepsilon^2). \qquad (1.30)$$

Соотношение (1.25) не зависит от величины деформируемого объема, оно определяется по первому закону термодинамики, который действителен и для кристаллических масштабов.

Динамическая вязкость в зависимости от температуры меняется по сложной кривой. Нулевое значение для металлов лежит за пределами точки плавления. Если иметь в виду процессы сварки давлением, для которых температура в плоскости контакта не

Таблица 1.2. Физические свойства металлов

Металл	$\theta_{пл}$, К	$\nu_{хол}\cdot 10^{13}$, Гц	$\nu_{пл}\cdot 10^{13}$, Гц	$\delta\cdot 10^8$, см	$\omega_{уд}$, м/с	η, Дж·с/см^3
Al	933	1,8	1,94	2,86	1387	1028
Cu	1356	1,5	2,82	2,55	1800	1200
Fe	1812	2,1	3,76	2,48	2330	1836
Ni	1728	1,9	3,59	2,48	2236	1520

выходит за границу плавления, то для приближенных расчетов можно положить

$$\eta \approx \eta_0 (1 - T/T_{пл}). \qquad (1.31)$$

Сопоставляя это допущение с формулой (1.26), получим

$$T = \frac{1}{2\gamma c l/(\eta_0 \varepsilon^2) + 1/T_{пл}}. \qquad (1.32)$$

В этой формуле константы γc относятся все же к макрообъемам металла. Формула (1.32), как будет показано дальше, дает вполне удовлетворительные результаты расчета во всех случаях, когда речь идет о некоторых объемах металла или о контактных плоскостях, где нагретые слои по толщине много больше, чем размеры элементарных кристаллов. Если же исследуется, например, чисто плоскостной сдвиг, то формулу (1.26) следует переписать с учетом того, что процесс происходит в микрообъемах. Тогда

$$p = \eta \varepsilon^2/(2l) = 3kn\theta, \qquad (1.33)$$

где k — постояниая Больцмана, равная $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К·атом; n — число атомов в 1 см^3; θ — температура, К.

Соответственно с ощутимой неточностью, вызванной заменой абсолютной температуры на температуру в °С, получим из (1.32)

$$T_\Delta = \frac{1}{6kn l_{сдв}/\eta_0 + (1/T_{пл})}. \qquad (1.34)$$

В этой формуле относительная деформация всегда равна единице, поскольку здесь сдвиг меньшим не может быть. Практически формула (1.34) более достоверна, чем (1.32), для деформации пирамидальных выступов шероховатых поверхностей, контактирующих друг с другом. В знак именно такой ориентации формулы (1.34) символу температуры придан индекс Δ.

Согласно предшествующим теоретическим соображениям, мы приняли, что независимо от используемой энергии эффект сваривания свершается в самый последний момент осадки, в момент максимальной концентрации энергии и за короткий промежуток времени. Формула (1.34) позволяет оценить значение той мгновенной вспышки температуры в плоскости контакта, при которой и формируется сварное соединение по этой плоскости идеально чистых кристаллов. Следовательно, идеальная чистота должна быть на таком же уровне чистоты, как и межкристаллитные границы внутри металла, которые не препятствуют ни размельчению зерен, ни их новому объединению.

Таким образом, всякая операция сдавливания при всех процессах сварки давлением принципиально делится на два этапа: первый этап — подготовительный — это удаление, выдавливание из зоны свариваемого контакта всех загрязнений; второй — непосредственное сваривание. Если металл не подвергается никакому предварительному подогреву, как это имеет место при холодной

сварке, то подготовительная операция обычно требует выдавливания заметного слоя металла по обе стороны от плоскости контакта.

Перейдем к исследованию процессов активации не только плоскости свариваемого контакта, но и некоторого слоя металла вокруг него. Никаких ограничений по видам энергии вводить не будем. Тогда для любого распределения температуры вокруг контакта можно будет написать равенство (рис. 1.16)

$$qt = 2\gamma c S x T_{ср}, \qquad (1.35)$$

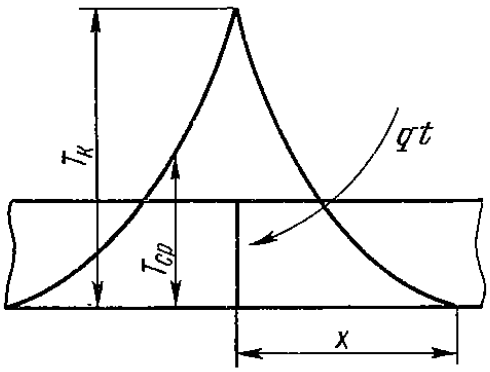


Рис. 1.16. Схема распределения температуры в плоскости свариваемого контакта при введении энергии в него

где qt — энергия, введенная в контакт, Дж; $T_{ср}$ — среднее значение температуры металла в объеме Sx, °С.

Значение этой температуры зависит от формы температурной кривой, которая по координате и времени определяется различными решениями уравнения теплопроводности Фурье,

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\lambda}{\gamma c}\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}.$$

Как известно, a — коэффициент температуропроводности, см²/с.

В зависимости от начальных и граничных условий уравнение Фурье дает различные кривые распределения температуры в глубину металла от плоскости контакта. Так, в частности, если вводимая в контакт мощность постоянна (q = const), то уравнение Фурье имеет решение в виде такой сложной функции:

$$T_{(x,\,t)} = \frac{q\sqrt{t}}{2\sqrt{\pi\lambda\gamma c S}}\Phi(\xi),$$

где $\Phi(\xi) = e^{-\xi^2} - \xi[1 - G(\xi)]$.

Параметр функции

$$\xi = x/(2\sqrt{at}). \qquad (1.36)$$

Выражение для G

$$G(\xi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^{\xi} e^{-\xi^2}\,d\xi$$

тоже представляет собой одно из решений уравнения Фурье.

Для случая, когда под действием мощности q в плоскости контакта мгновенно вспыхивает температура $T_к$, распределение температуры вокруг контакта определяется формулой

$$T_{(x,\,t)} = T_к[1 - G(\xi)].$$

На рис. 1.17 графически представлены эти функции.

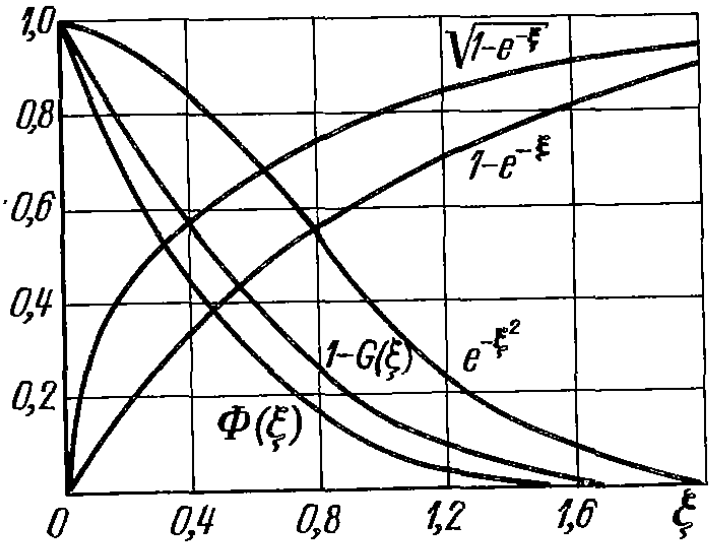


Рис. 1.17. Графики функций Φ (ξ), $1 - G(\xi)$, $e^{-\xi^2}$, $1 - e^{-\xi}$, $\sqrt{1 - e^{-\xi}}$

Для технологических расчетов достаточны меньшие точности и более простые формулы, сохраняющие наглядность связей всех переменных. Имея это в виду, можно аппроксимировать без больших ошибок кривые рис. 1.17 средней прямой, которая пересечет ось параметра ξ при его значении $\xi \approx 1$. При этом условии глубина, на которой температура не будет повышаться (см. рис. 1.17), определится так:

$$x = 2\sqrt{at}. \qquad (1.37)$$

Такую величину для x и можно принять при развертывании формулы (1.35). Тогда среднее значение температуры нагретого металла $T_{ср}$ в зависимости от формы температурной кривой может быть принято таким:

$$T_{ср} = mT_к. \qquad (1.38)$$

Для прямолинейного падения температуры $m = 1/2$, при выпуклости и вогнутости кривых значение m практически не выходит за пределы $^1/_3$—$^2/_3$.

Учитывая (1.37) и (1.38), перепишем равенство (1.35):

$$qt = T_к 4m\gamma cS\sqrt{at},$$

откуда

$$T_к = \frac{qt}{4m\sqrt{\lambda\gamma c}S\sqrt{t}}. \qquad (1.39)$$

Эта формула позволяет сделать далеко идущие теоретические и практические выводы. Прежде всего следует еще раз подчеркнуть, что для числителя qt мы не ставили никаких ограничений. Это — энергия, и притом какая угодно: однородная или комбинированная. Следовательно, для случая приложения к контакту только механической энергии формулу (1.39) можно переписать так: если

$$qt = Ph_м, \qquad (1.40)$$

то

$$T_к = \frac{Ph_м}{4m\sqrt{\lambda\gamma c}S\sqrt{t}}. \qquad (1.41)$$

Эта формула еще раз отчетливо показывает, что в стремлении получить в контакте максимально возможную вспышку темпера-

туры $T_к$, необходимо механическую энергию $Ph_м$ вводить в плоскость контакта или ударно-импульсным режимом, или кратковременным сдвигом.

Исследуем структуру формулы (1.39) с точки зрения ее критериального содержания. Безразмерное сочетание переменных (1.36) перепишем так:

$$4\xi^2 = \frac{x^2}{at} \text{ или } \frac{1}{4\xi^2} = \frac{at}{x^2} = \text{Fo}, \qquad (1.42)$$

где Fo — безразмерная критериальная величина at/x^2, или критерий Фурье.

Кривые, приведенные на рис. 1.17, показывают, что различные решения уравнения Фурье являются функциями от критериальной величины (1.36), или, что тоже самое, критерия Фурье. Можно показать, что уравнение теплопроводности Фурье построено на этом критерии. Если отбросить знаки дифференциала и разделить обе части равенства на отношение T/t, то получим определение (1.42).

Некоторые тепловые задачи решаются с помощью уравнения Фурье, учитывающего мощность теплового источника,

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{q_0}{\lambda t}, \qquad (1.43)$$

где $q_0 = q/x$, Вт/см.

Разделив обе части равенства (1.43) на T/t, получим:

$$1 = \frac{at}{x^2} + \frac{q_0}{\lambda T} \text{ или } 1 = \frac{at}{x^2} + \frac{q}{\lambda T x}.$$

Как видно, здесь фигурирует еще один критерий, который получил имя академика М. В. Кирпичева,

$$\text{Ki} = \frac{q_0}{\lambda T} = \frac{q}{\lambda T x}, \qquad (1.44)$$

где q — мощность источника, Вт.

Оба критерия (и Фурье, и Кирпичева) позволяют создать для некоторых процессов сварки расчетные формулы по определению сварочных режимов. Закономерность их применимости может быть доказана следующими выводами.

Из формулы (1.39) получаем

$$4m = \frac{qt}{T_к \sqrt{\lambda\gamma c}S\sqrt{t}}.$$

Умножаем числитель и знаменатель на коэффициент теплопроводности λ. Тогда

$$4m = \frac{\lambda qt}{\lambda T_к \sqrt{\lambda\gamma c}S\sqrt{t}} = \frac{q}{\lambda T_к \sqrt{S}} \frac{\sqrt{\lambda t}}{\sqrt{\gamma c}\sqrt{S}} = \text{Ki}\sqrt{\text{Fo}}. \qquad (1.45)$$

Этот вывод дает право сформулировать общее заключение: *тепловое состояние свариваемого контакта, активированного любым видом энергии, определяется произведением критерия Кирпичева в первой степени на критерий Фурье в половинной.*

Вывод (1.45) можно записать такими формулами, вводя обобщенный критерий подобия К:

$$\mathrm{K} = \mathrm{Ki}\sqrt{\mathrm{Fo}}; \quad \mathrm{K} = \frac{qt}{T_к \sqrt{\lambda\gamma c} S \sqrt{t}}. \qquad (1.46); (1.47)$$

Вернемся еще раз к формуле (1.39), обратив внимание на то, что для энергии qt мы не ставили никаких ограничений, т. е. она может быть любой: тепловой от экзотермической химической реакции, электрической, механической и пр. Если иметь в виду современные используемые виды энергии, то qt может быть представлено суммой:

$$qt = \varphi mc\theta + I^2(R_к + R_м)t_н + UIt_н + \mathbf{e}Un + \mu H^2 + Ph_м, \quad (1.48)$$

где $R_к$ и $R_м$ — изменяющиеся в процессе нагрева электрические сопротивления контакта и самого металла; $t_н$ — время действия сварочного тока I, т. е. время нагрева.

Из этой суммы энергий технолог может выбирать или любой один вид, или любые комбинации из членов в сумме, если только это может дать желаемый технологический эффект. Первое слагаемое в равенстве (1.48) относится, например, к газовому или термитному нагреву, второе — к контактной сварке, третье — к ней же для процесса оплавления или искрового разряда; eUn — это лучевая энергия; μH^2 — энергия магнитная и, наконец, $Ph_м$ — это энергия механическая. Как ни странно на первый взгляд, о последней надо говорить особо. Дело в том, что простейшее понятие $Ph_м$ как силы, умноженной на путь, в сварочных процессах может быть реализовано разными путями. Сила может быть статической, ударно-импульсной и знакопеременной. Путь может равняться линейной осадке, но может быть и иным. Так, при сварке трением

$$qt = P_{тр}y + P_{ос}h_м. \qquad (1.49)$$

В этой сумме y — это путь трения, равный

$$y = \pi\, dnt_{тр}/60, \qquad (1.50)$$

где d — средний диаметр стержней; n — частота вращения детали; $t_{тр}$ — время операции трения.

Формула (1.41) получает такой вид:

$$T_к = \frac{p_{тр}\pi\, dn\sqrt{t_{тр}}}{4m60\sqrt{\lambda\gamma c}} + \frac{p_{ос}h_м}{4m\sqrt{\lambda\gamma c}\sqrt{t_{ос}}}, \qquad (1.51)$$

где $p_{тр}$ — давление при операции трения; $p_{ос}$ — осадочное давление по окончании нагрева, которое, как видно, нужно прикладывать за короткое время $t_{ос}$, чтобы, во-первых, не упустить состоя-

ния подогрева, достигнутое за время $t_{тр}$, и, во-вторых, осуществить кратковременный, окончательный, сваривающий сдвиг.

Энергия может быть и комбинированной — электрическая плюс механическая. Их соотношение также может быть разнообразным. Например, для стыковой сварки методом сопротивления

$$qt = I^2 t_н (R_к + R_м) + P_{ос} h_м, \qquad (1.52)$$

Для стыковой сварки методом оплавления и ударно-стыковой

$$qt = U_{оп} I_{оп} t_{оп} + P_{ос} h_м, \qquad (1.53)$$

где $t_{оп}$ — время процесса оплавления при действующем токе оплавления $I_{оп}$ и напряжении на свариваемых деталях $U_{оп}$.

Имея в виду все изложенные выше частные соображения о видах энергии, которые можно вводить в контакт, и о величине температуры в плоскости контакта, которая развивается за счет этих энергий, следует написать:

$$T_{св} = T_к + T_Δ. \qquad (1.54)$$

Здесь первое слагаемое определяется формулой (1.39), а второе — ранее исследованной формулой (1.34). Если полностью развернуть сумму (1.54) по всем возможным составляющим вводимой энергии, то получим общее энергетическое равенство для любых процессов сварки

$$T_{св} = \frac{I^2 \sqrt{t_н} (R_к + R_м)}{4m \sqrt{\lambda \gamma c} S} + \frac{U_{оп} I_{оп} \sqrt{t_{оп}}}{4m \sqrt{\lambda \gamma c} S} +$$

$$+ \frac{p_{ос} h_м}{4m \sqrt{\lambda \gamma c} \sqrt{t_{ос}}} + \frac{p_{тр} \pi d n \sqrt{t_{тр}}}{240 m \sqrt{\lambda \gamma c}} +$$

$$+ 1 \left| \left(\frac{6knt_{сдв}}{\eta_0 \varepsilon^2} + \frac{1}{T_{пл}} \right) \right|. \qquad (1.55)$$

Равенство (1.55) интересно тем, что оно показывает, как можно комбинировать виды энергии для известных и освоенных процессов сварки. Например, стыковую сварку методом сопротивления определяют только два слагаемых равенства (1.55) — это первое и третье; для сварки непрерывным оплавлением — второе и третье; для сварки оплавлением с подогревом — первое, второе и третье. Однако это чисто внешние технологические признаки. Вскрыть внутреннюю сущность, а точнее, определить вклад каждого из слагаемых равенства (1.55) может только численный расчет. Для некоторых способов сварки, как, например, контактной точечной и шовной, можно и без расчета определить, что для них используется только первое слагаемое, поскольку металл доводится до плавления и поэтому осадочное давление не нужно. В этих процессах давление обеспечивает другие функции: оно создает начальный холодный контакт и во многих теперь случаях осуществляет опера-

цию проковки уже сваренного горячего металла. Равенство (1.55) может быть продолжено, например, для ультразвуковой сварки

$$qt = P\xi\omega t, \tag{1.56}$$

где P — сила сжатия; ξ — амплитуда колебаний; ω — частота колебаний; t — время полного цикла.

Соответственно (1.56) в сумме (1.55) появится слагаемое $p\xi\omega\sqrt{t}/(4m\sqrt{\lambda\gamma c})$.

Равенство (1.48) еще более существенно и в другом. Оно позволяет предсказать возможность создания новых, пока не используемых процессов сварки. Вряд ли, например, можно отрицать, что когда-нибудь не окажется целесообразным использовать одновременно и энергию трения, и электрический нагрев, т. е. суммировать первое и четвертое слагаемые. Могут быть и другие комбинации, например, любого из электрических нагревов с колебаниями ультра-, гипер- или просто звуковыми. Последние, например, С. И. Кучук-Яценко уже сочетает со вторым и третьим слагаемыми равенства (1.48).

Единственно, какой процесс сварки давлением не вписывается в равенство (1.48), так это диффузионная сварка в вакууме. Для нее, в классическом ее виде, при постоянных температуре и давлении в этом равенстве не подходит ни одно слагаемое.

Коэффициент диффузии, согласно определению Я. И. Френкеля, для условий печного нагрева

$$D = k\theta/(\eta\delta), \tag{1.57}$$

где $k\theta$ — тепловая энергия, которая сосредоточена в свариваемых деталях; при диффузионной сварке она равномерно распределена как по зоне контакта, так и по всей детали в целом; η — динамическая вязкость, или внутреннее трение; δ — параметр кристаллической решетки.

В последние годы для диффузионной сварки стали использовать программированное ударное давление. Мало того, замечено, что внешнее магнитное поле тоже оказывает влияние на процесс диффузии. На основании этих фактов формулу Я. И. Френкеля (1.57) следует дополнить механической ударной энергией фононов $h\nu$ и магнитной μH^2. При этих условиях коэффициент диффузии можно определить по такой формуле

$$D = (k\theta + h\nu + \mu H^2)/(\eta\delta). \tag{1.58}$$

В знаменателе этой формулы коэффициент, характеризующий внутреннее трение, как и ранее, определяется формулой (1.31).

Формула (1.58) показывает, что коэффициент диффузии по свариваемому контакту может возрасти действительно в миллионы или даже миллиарды раз против его значения, известного для условий статического нагрева всего объема металла. Такие именно миллионнократные возрастания за счет ударных давлений и были

зафиксированы экспериментально Л. Н. Лариковым, В. Р. Рябовым и В. М. Фальченко.

Формула (1.58) дает объяснение совершенно необычной скорости диффузии при сварке взрывом. В момент соударения зафиксированы частоты более жесткого излучения, чем ультрафиолет. Следовательно, это частоты порядков 10^{15}—10^{16} Гц. Температура свариваемых поверхностей в результате значительно превышает точки кипения. Внутреннее трение η стремится к нулевому значению. Соответственно всем этим фактам коэффициент диффузии D возрастает при сварке взрывом в миллиарды раз по сравнению с тем значением, которое характерно для статических печных нагревов.

Энергетическое равенство (1.48) хотя и содержит много переменных, но не все те, какие вообще участвуют в процессе формирования сварного соединения.

Обратимся к некоторым типовым примерам из практики.

Рассмотрим стыковую сварку методом сопротивления стержней из стали Ст3 диаметром 12 мм. Осциллограмма зафиксировала: среднее значение тока нагрева $I = 6350$ А. Время нагрева 2,3 с. Сила сжатия $P = 5650$ Н. Время осадочной операции $t_{\text{ос}} = 1$ с. Размер осадки $h = 5$ мм. Коэффициент аккумуляции теплоты для стали Ст3 примем $\sqrt{\lambda\gamma c} = 1{,}47$ Дж/(см^2·°С·с$^{1/2}$), коэффициент $m = 1/2$. Тогда при $Ph = 5650 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 28{,}52$ Дж

$$T_{\text{к}} = \frac{Ph_{\text{м}}}{4m\sqrt{\lambda\gamma c}\, S\sqrt{t_{\text{ос}}}} = \frac{28{,}25}{4 \cdot 1/2 \cdot 1{,}47 \cdot 1{,}13 \cdot 1} = 8{,}5\,^{\circ}\text{С}.$$

Тепловой расчет показывает, что электронагрев в зависимости от величины контактного сопротивления обеспечивает температуру в плоскости контакта 1200—1300 °С. При этих условиях встает парадоксальный вопрос: зачем же вообще нужна механическая осадка, если она добавляет к электронагреву в 1200—1300 °С всего 8,5 °С. Однако выше обращалось внимание на то, что осевая осадка неизбежно завершается сдвиговым эффектом по плоскости контакта. И если на этот сдвиговый эффект положить те же $t_{\text{сдв}} = 1$ с, то по формуле (1.34) получим

$$T_{\Delta} = \frac{1}{6 \cdot 1{,}38 \cdot 0{,}84 \cdot 1/1836 + 1/1450} = 223\,^{\circ}\text{С}.$$

А это уже такая существенная добавка, которая или весьма приблизит суммарную температуру $T_{\text{св}} = T_{\text{к}} + T_{\Delta}$ к точке плавления, или даже превысит ее, стоит только слегка ускорить операцию осадки. Превышение точки плавления по плоскости контакта не только реальная вещь, но, вероятно, даже желательная. Не следует только забывать, что добавление температуры T_{Δ} имеет место только в самой плоскости сдвига, а не в глубинных слоях металла вокруг контакта.

Можно привести и другой характерный пример. Это ударно-стыковая сварка с разрядом конденсатора на свариваемый контакт. Одна из осциллограмм зафиксировала длительность процесса сварки медных проволок 0,003 с. Время осадки и, следовательно, время деформации сдвига $t_{oc} = 0{,}001$ с. По формуле (1.34) для меди

$$T_{\Delta} = \frac{1}{6 \cdot 1{,}38 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}001/1200 \cdot 1 + 1/1083} = 1076\,^{\circ}\text{C}.$$

Отсюда приходится делать вывод, что ударное давление выбивает из контакта весь кипящий металл, нагретый разрядом конденсатора. Сдвиговый же удар по плоскости контакта обеспечивает температуру плавления. Этот факт вполне объясняет структуру сваренного контакта. Его плоскость раздела не отличается от межкристаллитных границ. Таким образом, медленная (за 1 с) осадочная операция при сварке методом сопротивления не дает заметной температурной добавки, но скоростная осадка обеспечивает решающий температурный эффект по плоскости контакта. Достаточно заметная по величине составляющая T_{Δ} получается и при сварке трением.

На основании приведенных конкретных примеров равенство (1.55) можно расценить как основное технологическое. В нем несколько слагаемых, обусловленных разными видами энергии, но все эти слагаемые дают общую, уже не разделяемую сумму температур. Это значит, что все виды энергии можно регулировать с любой точностью, причем особенно гибко регулируется энергия механическая. В связи с этим следует сделать вывод, что проектировщики современных машин для сварки контактной, трением, холодной мало интересуются скоростью действия сил сжатия, а в основном только их величиной. Характерно, что до сих пор ни в одном литературном источнике не приводится данных о том, какая именно скорость деформации может и должна быть обеспечена. Даются только предельные значения давлений, которые может развить машина. Энергетическое равенство (1.55) убедительно показывает полную недостаточность существующих технологических рекомендаций по параметрам давления. К тому же эти рекомендации неопределенны, поскольку не говорят о программе приложения рекомендуемых давлений. Вот в этой неопределенности и заложены главные причины нестабильности качества сварных соединений. Все приведенные теоретические материалы убедительно говорят о том, что давление должно выжать из плоскости контакта все загрязнения — это условие необходимости. Условие же достаточности обеспечивает завершающий момент деформации сдвига: формируется сварное соединение. И чем кратковременнее осуществляется сам сдвиг, тем стабильнее и выше прочность сварного соединения.

Энергетическое равенство (1.48) говорит о том, что любые, до сих пор отработанные и общепринятые режимы могут быть пол-

ностью отвергнуты. Вместо них с их установившимися в практике нормами сил сжатия. сил токов и времени действия этих переменных для любого металла могут быть найдены пока не рекомендуемые, но еще лучшие характеристики технологических режимов. Рассмотренные выше теоретические и расчетные материалы дают полное основание сделать вывод: главным и решающим фактором, определяющим все процессы сварки давлением. является механическая энергия, которую благодаря малой ее инерционности можно вводить в свариваемый контакт по любой программе.

Правильное понимание этого принципа позволяет пересмотреть устарелые границы рекомендуемых режимов и найти новые сочетания. например, между электронагревом и осадочными давлениями.

Равенство (1.55) позволяет предсказывать появление новых способов сварки давлением. Их многообразие, однако, будет определять не тепловая, в том числе электрическая энергия, а энергия механическая, различным образом программированная. И термин «контактная сварка» получит, вероятно, более широкое содержание.

Не следует также забывать о возможности всестороннего сжатия отдельных кристаллических организаций. Как было показано на рис. 1.13, деформации такого рода могут создать высокую степень активации контакта. Однако для достижения такой цели скорость деформации должна быть весьма высокой, что обеспечивается при ударной силе. Допустим, что ударно-импульсная сила действует на некоторую, уже макромасiштабную плюскость. Тогда можно сказать, что удар фононного потока воспринимают все поверхностные атомы этой плоскости. Колебательная энергия атомов может быть доведена до состояния плавления кристалла, что и определится равенством $h\nu_{пл} = k\theta_{пл}$.

Зная, что для плавления достаточно сблизить атомы на одну четверть параметра решетки (см. рис. 1.13), можно определить

$$\nu_{пл} = k\theta_{пл}/h = 0{,}208 \cdot 10^{11}\theta_{пл}.$$

Скорость удара для плавления $\omega_{уд} = \delta\nu_{пл}/4$. Значения этих скоростей для некоторых металлов приведены в табл. 1.2. Как известно, такие или несколько менее высокие скорости удара имеют место при сварке взрывом.

Все изложенное выше убедительно говорит о том, что свариваемый контакт только в редких случаях подобен статическому контакту между металлическими поверхностями. Этот вывод может быть подтвержден и еще одним расчетом применительно к контактированию холодных деталей при точечной сварке. Сохраняя принятую выше пирамидальную модель шероховатости, рассмотрим процесс деформации некоторой единичной пирамиды (рис. 1.18). Допустим, электрод точечной машины своим ударом деформирует эту единичную пирамиду так, что ее поверхность за счет сдвига получает нагрев до температуры $T_Д$, а весь смятый объем нагре-

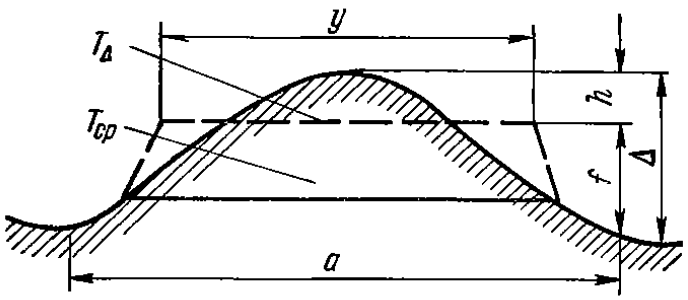


Рис. 1.18. К расчету деформации единичной пирамиды при сжатии

вается до температуры $T_{ср}$. Тогда энергетический баланс механического удара электродов запишется таким равенством

$$Ph = \gamma c V T_{ср} + 2\lambda_к T_\Delta y t,$$

где V — смятый объем металла пирамиды, $V = y^2h/3$; $\gamma c V T_{ср}$ — теплосодержание объема за счет энергии деформации; $\lambda_к$ — коэффициент теплопроводности контакта, совершенно отличающийся от коэффициента теплопроводности металла глубинных слоев.

Значение средней температуры $T_{ср}$, можно, по-видимому, положить равным $T_\Delta/2$. Тогда энергетический баланс

$$Ph = \gamma c V T_\Delta/2 + 2\lambda_к T_\Delta y t.$$

Если коэффициент теплопроводности контакта $\lambda_к$ значительно отличается от той же характеристики металла, то следует оценить, в какой мере правомерно учитывать γc для контакта как характеристику целого металла.

Допустим, что в объеме смятой вершины микропирамиды оказываются запрессованными все оксидные наслоения. Тогда следует сопоставить значения энтальпии γc [Дж/(см^3·°С)] металла и его оксидов при $T = 900$ °С:

Для Fe	5,00
» FeO	4,93
» Fe_2O_3	5,76
» Fe_3O_4	8,90

В результате можно сделать вывод, что если смятая железная пирамида будет хотя бы наполовину состоять из оксидов, то и в этом случае величину γc для контакта следует принимать такой же, как и для чистого металла.

Согласно достоверным исследованиям В. М. Попова [16], коэффициент теплопроводности контакта вычисляется по формуле

$$\lambda_к = (\Delta_1 + \Delta_2)/(2R),$$

где Δ_1 и Δ_2 — высоты контактирующих пирамид; R — тепловое сопротивление их контакта.

Существуют опытные данные для контакта поверхностей из стали 45, обработанных шлифованием, с высотой пирамиды $\Delta_1 = \Delta_2 = 40$ мкм. При давлении 58 МПа тепловое сопротивление оказалось равным $R = 1{,}6 \cdot 10^4$ (м^2·°С)/Вт. Согласно этому,

$$\lambda_к = \frac{2\Delta}{2R} = \frac{40 \cdot 10^4}{10^6 \cdot 1{,}6} = \frac{25}{10^2} \text{ Вт/(м·°С)} = \frac{25}{10^4} \text{ Вт/(см·°С)}.$$

Поскольку коэффициент теплопроводности конструкционной стали составляет 0,4 Вт/(см·°С), то, следовательно, эта же харак-

теристика для контакта такой стали в 160 раз меньше. Контакт весьма нетеплопроводен. Для того чтобы определить температуру мгновенного нагрева поверхности пирамидального выступа шероховатости в момент удара по контакту электродами точечной машины, надо решить два уравнения с двумя неизвестными:

$$\left.\begin{aligned} Ph &= 0{,}5\gamma c V T_\Delta + 2\lambda_к T_\Delta y t; \\ T_\Delta &= \frac{1}{6knt/(\eta_0 \varepsilon^2) + 1/T_{пл}}. \end{aligned}\right\} \qquad (1.59)$$

Неизвестными здесь являются T_Δ и t.

Рассмотрим конкретный пример точечной сварки стальных листов толщиной 4 + 4 мм. Для них следует предварительно произвести все расчеты, касающиеся вообще площадей контактирования, с использованием формул (1.10), (1.13), (1.15), (1.8).

Вычисления площадей контактирования по этим формулам, как уже отмечалось, справедливы для контактов, которые создаются статическим давлением, и весьма приближенны для условий ударного сдавливания, характерного для точечной сварки. Наименьшая неточность может быть обеспечена в том случае, если выбирать значения предела текучести металла и сопротивления деформации для шероховатостей, соответствующие максимальному наклепу металла. Принимаем следующие значения этих величин. Сила сжатия электродов 8000 Н. Предел текучести стали Ст3 $\sigma_т = 250$ МПа. Диаметр сварной точки $d_т = 12$ мм. Контактирующие поверхности обработаны наждачным кругом. Соответственно этому $\Delta = 60$ мкм; $b = 1$; $\nu = 2$ (см. табл. 5 приложения). Отношение $a/\Delta = 25$. Учитывая все это, производим расчеты:

$$Z = 0{,}535/d^2; \quad A_c = 0{,}57 \text{ см}^2.$$

Действующее давление

$$p = P/A_c = 140 \text{ МПа}.$$

Основание пирамиды $a = 2\Delta = 0{,}12$ см, тогда

$$a^2 = 144/10^4 \text{ см}^2.$$

Число пирамид в границах контурного круга

$$n = A_c/a^2 = 40.$$

По формуле (1.11) критерий $X = 0{,}082$.

Здесь принимаем предел текучести, равный 850 МПа, соответственно наклепу, близкому к 90 %.

Фактическая площадь контакта $A_r = 0{,}047$ см^2. Площадь элементарного контакта смятой пирамиды

$$y^2 = A_r/n = 12 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2; \quad y = 3{,}42 \cdot 10^{-2} \text{ см}.$$

Высота смятой пирамиды исходя из постоянства объема определится так:

$$f = \frac{\Delta}{1 + \frac{y^2}{a^2} + \frac{y}{a}} = \frac{\Delta}{2 - e^{-X} + 1/\sqrt{1 - e^{-X}}}.$$

В данном случае $f = 35{,}35$ мкм.

Осадка пирамиды (см. рис. 1.18)

$$h = \Delta - f = 60 - 35{,}35 = 24{,}65 \text{ мкм}.$$

Объем смятого участка

$$V = y^2 h/3 = 95{,}5 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3.$$

Относительная деформация

$$\varepsilon = 1 - 35{,}35/60 = 0{,}41; \quad \varepsilon^2 = 0{,}168.$$

Сила сжатия, приходящаяся на единичную пирамиду,

$$P/n = P' = 8000/40 = 200 \text{ Н}.$$

Энергия удара на одну пирамиду

$$P'h = 200 \cdot 24{,}5 \cdot 10^{-6} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}.$$

Теперь, имея все постоянные величины, напишем для (1.59):

$$5 \cdot 10^{-3} = 0{,}5 \cdot 5 \cdot 95{,}5 \cdot 10^{-8} T_\Delta + 2 \cdot 25 \cdot 10^{-4} \cdot 3{,}42 \cdot 10^{-2} T_\Delta t;$$

$$T_\Delta = \frac{1}{6 \cdot 1{,}38 \cdot 0{,}84t/1836 \cdot 0{,}168 + 1/1450}.$$

Решая их совместно, получаем:

$$T_\Delta = 910 \text{ °C}; \quad t = 0{,}018 \text{ с}.$$

Скорость деформации оказывается около 0,14 см/с.

Как видно, и при контактной точечной сварке ударный сдвиг в момент торможения создает мгновенную вспышку высокой температуры деформируемых выступов по плоскости свариваемого контакта.

Все приведенные соображения и расчеты дают основание сделать весьма существенные новые выводы о роли механических деформаций в электрических процессах в свариваемом контакте.

В этой книге неоднократно подчеркивалось отличие свариваемого, весьма динамического в своем поведении контакта, от контакта статического, машиностроительного: скоростное введение механической энергии в свариваемый контакт вызывает в нем одновременно и тепловую, и электрическую активацию.

Основная роль электронных конфигураций в металле проявляется в том, что при всех деформациях, т. е. при любых нарушениях исходной структуры, перемещение электронных конфигураций стремится привести систему в новое, последеформационное

равновесие. Равновесие устанавливается не мгновенно, а вспыхивая импульсом, угасает во времени иногда в течение даже не секунд, а минут.

Степень деформации, ее скорость и геометрия деформируемых микроконтактов различны. В результате между каждой парой выступов получаются различные значения термоэлектродвижущей силы. Эти разности термо-ЭДС создают уравнительные круговые токи по плоскости контакта. Еще большее усложнение вносят оксидные наслоения на металле. Связь металла с его оксидом — чисто электрическая. Всякие разрывы этой связи создают мгновенные электрические микроразряды, которые для тех же микрообъемов вызывают еще один вид активации — электроплазменный.

Вполне достоверно предполагать, что для окисленных поверхностей давление сдвига при ударе создает еще более активированный контакт с образованием в нем одновременно вспышек высокой температуры и плазменной среды. Одновременная и высокотемпературная, и электроплазменная активация является, вероятно, постоянно действующим фактором, определяющим прохождение тока через несвариваемый оксидированный контакт электрод — деталь при точечной сварке. В этом контакте непрерывно чередуются, при каждом ударе, разрывы оксидных пленок и новые их формирования после удара, если толщина пленки не станет столь значительной, что удар не обеспечит ее разрывов.

На основании изложенных выше физических соображений следует признать, что интервал времени между механическим ударом электродов и моментом включения сварочного тока не может быть любым, произвольным.

1.4. Теория электрических сопротивлений свариваемых контактов

Все поверхностные и граничные явления, происходящие при неустановившихся состояниях на контактирующих поверхностях, имеют прямое отношение к свариваемым контактам. С этой точки зрения любой способ сварки давлением может быть назван контактной сваркой, но собственно электрическая контактная сварка отличается тем, что через свариваемый контакт специально пропускается электрический ток. Этот факт усложняет все поверхностные и граничные процессы в контакте, превращая их из физико-химических в сложнейшие электрофизические и, наконец, в металлоструктурные.

Электрический свариваемый контакт или полностью определяет энергетику сваривания, или обеспечивает значительное влияние на тепловой процесс при сварке.

Для того чтобы правильно управлять технологией сварки, технолог-сварщик должен отчетливо представлять сущность электротепловых процессов в контакте и правильно оценивать роль контактных сопротивлений.

К сожалению, до настоящего времени в сварочной литературе часто встречаются такие формулы для определения электрических сопротивлений контактов, которые следует считать неприемлемыми, так как они не отражают физических процессов, происходящих в контакте. Одной из таких следует считать формулу

$$R_к = r_{1к}/P^{\alpha}, \tag{1.60}$$

где $R_к$ — электрическое сопротивление контакта, Ом; $r_{1к}$ — сопротивление контакта при единичной силе сжатия; P — единичная сила сжатия; α — показатель степени, скрывающий влияние всех переменных — геометрических, поверхностных и любых других физических.

Формула (1.60) создана Хольмом — Чельчлином 60 лет назад и не для свариваемых, а для шинных контактов с болтовым креплением. Только для такого рода электротехнических контактов она и пригодна.

К сожалению, в современную сварочную литературу некоторые авторы настойчиво внедряют формулы, еще более лишенные всякого физического смысла:

$$R_д = \left(24 + \frac{44 \cdot 10^7}{d_э^8}\right) \delta^{0,59 d_э^{-0,12}} e^{-0,00014P} 10^{-6}, \tag{1.61}$$

где $R_д$ — эквивалентная геометрическая составляющая полного сопротивления контакта листов при точечной сварке; $d_э$ и δ — диаметр электрода и толщина листа.

Опасность и вредность формул типа (1.60) и (1.61) в том, что они внушают неискушенному технологу примитивные представления о свариваемом контакте как о некоем стационарном соединении. Эти формулы закрывают перед технологом все действительные сложные взаимозависимости, благодаря которым величины электрического сопротивления контакта при одних и тех же силах сжатия могут отличаться на несколько порядков.

К настоящему времени достоверная теория электрических сопротивлений свариваемых контактов разработана пока далеко не полно, и те теоретические материалы, которые излагаются ниже, могут считаться достаточными только для сегодняшней технологии.

Определим, что такое электрическое сопротивление металлического контакта. Как видно, эта характеристика представляет собой частное от деления приложенного к контакту электрического потенциала $U_к$ на мгновенное значение силы тока через контакт $I(t)$, т. е.

$$R_к = U_к/I(t). \tag{1.62}$$

Ток через контакт может быть переменным, униполярным или постоянным.

Самое существенное заключается в том, что амплитудное значение электрического потенциала прикладывается мгновенно, а сила тока, независимо от формы его кривой, нарастает во времени при включении от нуля до его амплитудного значения. Время

установления силы тока — это сотые и тысячные доли секунды. И все же в момент $t = 0$, т. е. в момент включения $U_к$, сила тока $I = 0$ и, соответственно, мгновенное значение контактного сопротивления должны получаться бесконечно большими, как это формально следует из определения (1.62). В действительности это не так. Выше уже было показано, что задолго до момента включения тока механическая деформация в плоскости контакта вызывает целый ряд чисто электрических явлений. Электрический заряд экзоэлектронного облака, круговые микротоки различно деформированных микроконтактов, плазменные потоки от разрывов электрической связи оксидных пленок с металлом — все эти эффекты создают такую суммарную противоэлектродвижущую силу, которая даже в момент включения, т. е. при $t = 0$, в значительной степени уравновешивает потенциал $U_к$. Точные измерения, выполненные в Институте электросварки С. Н. Мещеряком и И. В. Пентеговым, показали, что контактное сопротивление, действительное в момент $t = 0$, оказывается значительно больше установившегося значения, но не бесконечно большим.

Следует подчеркнуть, что все физические микроявления в плоскости контакта практически не управляются и не регулируются посредством макроскопических средств. Поэтому в технологической практике придают большое значение стабилизации состояния металлических поверхностей контактируемых деталей. Однако ни механические, ни химические способы зачистки металла не способны устранить значительную геометрическую и физическую неопределенности поверхностей в зоне контактирования. Так, табл. 5 приложения, показывающая параметры шероховатостей, содержит элементы заметной неопределенности: достаточно посмотреть на возможные размеры высоты и основания пирамид. Мало того, пирамидальное моделирование — это весьма идеализированное моделирование действительности. Механические свойства металла микропирамид тоже весьма неопределенны, так как зависят не только от степени искаженности и дефектности кристаллических организаций, но и от степени насыщенности пирамид оксидными включениями.

Структурная нестабильность металлических поверхностей обусловливает и еще одну неопределенность — разброс значений удельного сопротивления пирамид. Так можно ли и нужно ли ставить задачу создания для технологов расчетных систем по определению электрических сопротивлений свариваемых контактов? Безусловно нужно, но не для расчетов. Это необходимо для того, чтобы расчетные формулы возможно более наглядно показывали взаимосвязь друг с другом большого числа переменных, определяющих контактирование. Теоретические формулы должны показывать и все вероятностные неопределенности, которые могут помешать установить действительные искомые характеристики. За многие десятки лет технологической деятельности автор не знает случаев, когда цеховой или лабораторный технолог производил бы расчеты

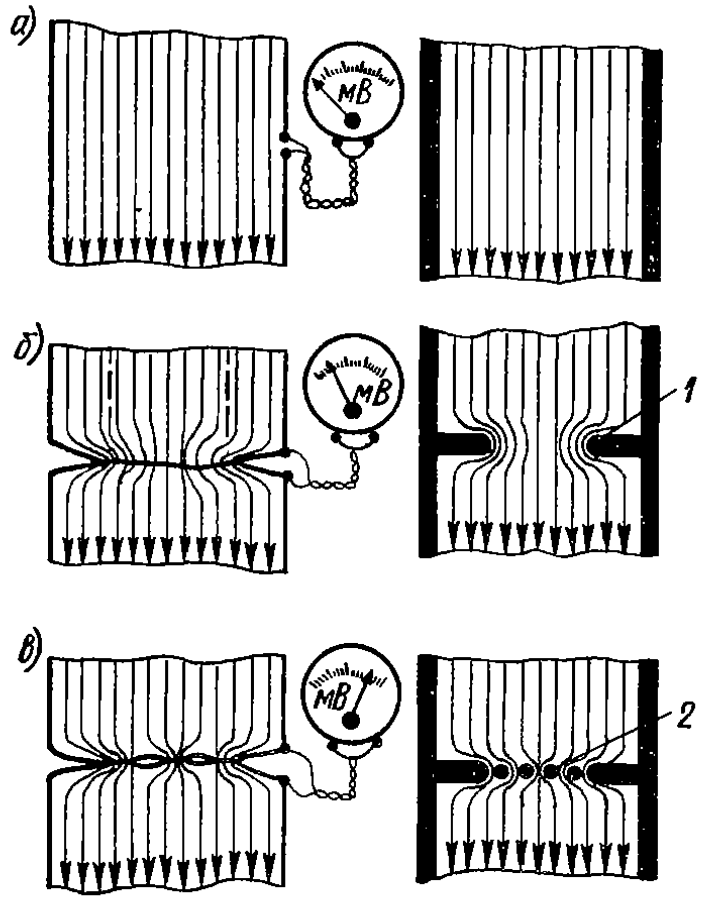


Рис. 1.19. Модель струйного движения вязкой жидкости по трубе (справа) и течение электрического тока через контакт (слева)

электрических сопротивлений холодных контактов и когда бы ему необходимы были эти расчеты.

Правильное же понимание физической сущности электротепловых процессов немыслимо без тех теоретических расчетных формул, которые на сегодня могут считаться достоверными. При этом неоднократно приходится прибегать к использованию понятий подобия и к некоторым аналогиям. Вполне, например, допустимо провести аналогию между течением по трубе вязкой жидкости и течением электрического тока по проводу. Эту аналогию рассмотрим с помощью трубной модели. Силовые линии электрического тока можно уподобить струям ламинарного потока вязкой жидкости (рис. 1.19, *а*). Эти струи встречают концентрированное сопротивление своему движению относительно диафрагмы *1*, вставленной в трубу (рис. 1.19, *б*), что приводит к искривлению струй. Если посередине диафрагмы вставлена решетка *2* (рис. 1.19, *в*), то происходит добавочное, уже микроскопическое искривление струй, и тем самым вводится дополнительное сопротивление движению жидкости. Сопротивления диафрагмы и решетки суммируются. Удалить решетку — значит снять микрогеометрическое искривление и уменьшить общее сопротивление. Ликвидировать диафрагму — устранить вообще всякое местное концентрированное сопротивление. Остается постоянно действующее, равномерно по длине трубы распределенное сопротивление трения жидкости о стенки трубы.

Обратимся к модели стыкового контакта, показанного на рис. 1.8. Относительно контурной площади контакта линии электрического тока искривляются так же, как струи жидкости, протекающей сквозь диафрагму. Что же касается группы элементарных площадок контакта ΔA_r, то они обеспечивают такого же рода микроискривления линий тока, какие создает внутридиафрагменная решетка в трубе для струй жидкости. Теперь видно, что общее, или полное электрическое сопротивление контакта можно представлять как сумму

$$R_{кс} = r_{гс} + r_{мг}, \qquad (1.63)$$

где $r_{гс}$ — геометрическая составляющая полного сопротивления стыкового контакта $R_{кс}$ (эта составляющая определяется искривлением линий электрического тока, определяемым контурной площадью контакта); $r_{мг}$ — внутреннее сопротивление контакта, которое создается искривлением линий электрического тока при протекании через микроконтакты шероховатости. Равенство (1.63) соответствует случаю контактирования идеально чистых металлических поверхностей.

Если же шероховатая поверхность к тому же покрыта физически ощутимым слоем оксида, то сумма (1.63) усложняется еще двумя слагаемыми: сопротивлением материала самой оксидной пленки $r_{пл}$ и полярным сопротивлением границы оксид — металл $r_{грт}$. Эта последняя составляющая полярна по той причине, что каждый оксид — это полупроводник, и на границе его с чистым металлом создается электронно-дырочный переход. Мало того, если где-то в плоскости контакта возник островок расплавленного металла, то и граница жидкого металла с твердым тоже представляет собой полярное электрическое сопротивление. Всякая граница структурно различных объемов в металле, а также граница химически различных веществ является физическим контактом. Само собой разумеется, что количественный учет сопротивлений $r_{пл}$, $r_{грт}$ и других граничных сопротивлений очень сложен и теоретическим расчетам вообще не поддается. К счастью, расчеты этих сопротивлений практически не нужны. Однако помнить о существовании этих сопротивлений необходимо, поскольку значительный элемент нестабильности электрических сопротивлений холодных контактов обусловливается именно оксидными и адсорбционными наслоениями на контактирующих поверхностях.

Если определить сумму тех главных и основных составляющих полного сопротивления контакта, о которых технолог должен помнить постоянно, то для стыкового контакта

$$R_{кс} = r_{гс} + r_{мг} + r_{пл}. \qquad (1.64)$$

Расчет первой составляющей, как будет показано ниже, обеспечивается с достаточной инженерной точностью. Расчет второй составляющей, как уже отмечалось, содержит ощутимую неопределенность. Третья составляющая вообще пока уверенному расчету не поддается.

Для отчетливого представления об электрических сопротивлениях контактов или целых фигур сложной формы, которые приходится подвергать нагреву, необходимо установить: что же такое есть «искривление линий электрического тока» и почему это определяет местную концентрацию электрического сопротивления.

Если границы A и B (рис. 1.20) связаны силовыми линиями электрического поля, то сопротивление единичной трубки тока

$$r_{ед} = \int_A^B \frac{\rho\, dx}{\Delta S}. \qquad (1.65)$$

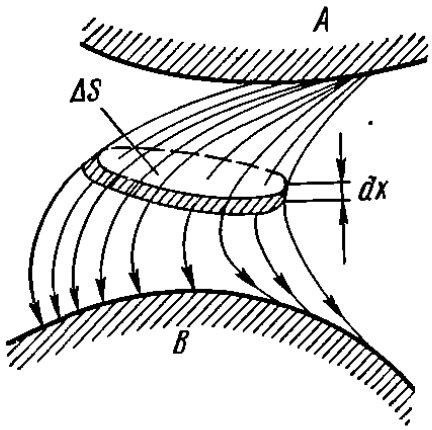


Рис. 1.20 Схематическое изображение линий электрического тока в проводящей среде

В этой записи удельное сопротивление может быть переменным по длине трубки, т. е. $\rho = f_1(x)$, а сечение трубки тоже переменным в пространстве от A до B:

$$\Delta S = f_2(x),$$

тогда (1.65) перепишется так:

$$r_{\text{ед}} = \int_A^B \frac{\rho(x)\,dx}{\Delta S(x)}. \qquad (1.66)$$

Отсюда видно, что бóльшая кривизна трубки удлиняет путь тока от одной границы к другой, а этот факт и создает эффект возрастания электрического сопротивления.

Если ρ постоянно по всей длине и сечение трубки также постоянно, то

$$r_{\text{ед}} = \rho x/\Delta S, \qquad (1.67)$$

но это только при условии абсолютно равномерного распределения тока по сечению трубки, что имеет место только для проволок или стержней, когда по ним протекает постоянный ток. Если же имеем дело с более сложными геометрическими фигурами, то и при постоянном токе электрическое сопротивление вычислить правильно по формуле (1.67) нельзя. К сожалению, этот принцип почти все технологи совершенно упускают из виду. Для того чтобы внести полную ясность в понятия электрических сопротивлений конкретных контактов и деталей, необходим подробный анализ распределения электрического тока в металле.

Рассмотрим несколько типовых токоведущих деталей.

Цилиндрический стержень по рис. 1.21, *а*, нагруженный постоянным током, оказывает электрическое сопротивление между точками *1—2*, точно соответствующее рассчитанному по формуле (1.67). Однако сопротивление конического стержня (рис. 1.21, *б*) надо определять, руководствуясь формулой (1.65). Если высоту всего (целого) конуса обозначить Δ, то применительно к схеме, изображенной на рис. 1.2, *б*, можно записать равенство тангенсов:

$$\frac{D}{2\Delta} = \frac{d}{2(\Delta - l)},$$

откуда

$$d^2 = \frac{D^2(\Delta - l)^2}{\Delta^2}.$$

Сделав подстановку в формулу (1.66), сопротивление усеченного конуса можно определить:

$$r_{\text{г}} = \frac{4\rho}{\pi}\int_0^l \frac{dx}{d^2} = \frac{4\rho}{\pi}\int_0^l \frac{\Delta^2\,dx}{D^2(\Delta - l)^2} = \frac{4\rho l}{\pi D d}. \qquad (1.68)$$

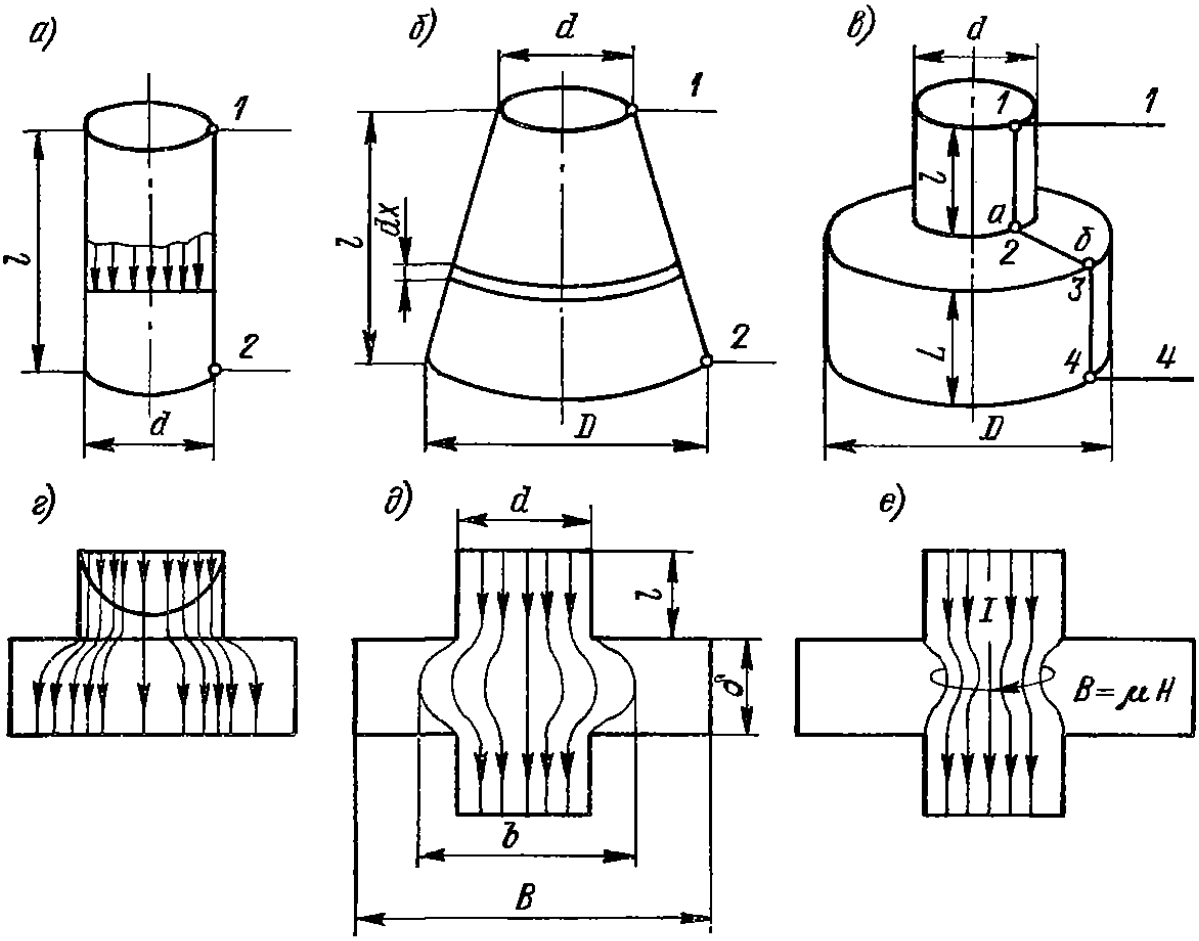


Рис. 1.21. Различные модели свариваемых деталей и распределение электрического тока по их сечению

Каждый из стержней рис. 1.21, *в* оказывает сопротивление:

$$r_{1-2} = 4\rho l/(\pi d^2); \quad r_{3-4} = 4\rho L/(\pi D^2).$$

Однако общее сопротивление r_{1-4} не будет равно их сумме:

$$r_{1-2} + r_{3-4} < r_{1-4}.$$

Этот факт объясняется тем, что между точками *2—4* будут существовать искривленные линии тока, а по плоскости перехода будет иметь место еще и эффект концентрации плотности тока по границе перехода (рис. 1.21, *г*). Искривление и концентрация создают дополнительное сопротивление, что и отражает написанное выше неравенство.

Рис. 1.21, *г* и особенно рис. 1.21, *д* наглядно показывают, что геометрия детали и геометрия области распространения линий тока могут решительно отличаться друг от друга. Следовательно, *электрическое сопротивление всякого проводящего участка надо определять не по геометрии этого проводника, а по геометрии пространства в нем, охватываемого линиями тока.*

Так, в частности, размер *B* (рис. 1.21, *д*) может быть и очень большим, но это вовсе не значит, что линии тока будут растекаться на все пространство *B*. В действительности растекание линий тока всегда какое-то ограниченное (границы его характеризуются размером *b*). Дальше, в следующем параграфе, будет показано, что магнитное поле самого тока может вообще ограничить расте-

кание. Линии тока могут быть сжаты, как это показано на рис. 1.21. *е*.

Принимая во внимание рассмотренные принципы растекания тока в металле, можно вернуться к понятиям контактных сопротивлений. Теперь уже ясно, что, измеряя полное сопротивление стыкового контакта, мы учитываем все макро- и микроискривления линий электрического тока и можем судить, насколько эта кривизна велика при ступенчатом изменении малого диаметра d на большой D.

Если металлические поверхности идеально очищены от оксидных пленок и если оказалось, что по контурному кругу диаметром d детали сварились, то сопротивление стыкового контакта по формуле (1.63) превратится в $R_{кс} = r_{гс}$.

В электротехнической литературе существуют методы расчета, по которым можно определить, что

$$r_{гс} = \rho\,(1/d - 1/D). \tag{1.69}$$

Эта формула отвечает, как видно, физическому смыслу изменения величины $r_{гс}$ для любого значения ρ и любого размера d. Согласно формуле (1.8),

$$d = D\sqrt{1 - e^{-z}}. \tag{1.70}$$

В то же время

$$\rho \approx \rho_0\,(1 + \alpha T), \tag{1.71}$$

α — температурный коэффициент сопротивления.

Подставляя в (1.69), получаем:

$$r_{гс} = \frac{\rho\,(1 + \alpha T)}{D}\left(\frac{1}{1 - e^{-z}} - 1\right). \tag{1.72}$$

По этой формуле уже можно вычислять изменения величины $r_{гс}$ при изменении температуры. С другой стороны, изменение полного сопротивления стыкового контакта от температуры можно установить экспериментально. Для этой цели снимают осциллограммы: $U_к = f\,(t)$; $I_{св} = f\,(t)$; $T_к = f\,(t)$.

По зависимостям такого рода, показанным на рис. 1.22, можно считать, что полное сопротивление контакта в процессе сварки стержней диаметром 12 мм $R_{кс}$ падает от начального значения к нулевому линейно. Вычислим по формуле (1.72) изменение соответствующей составляющей $r_{гс}$. Вычитая из ординат $R_{гс}$ ординаты $r_{гс}$, получим достоверную кривую изменения $r_{мг}$ (рис. 1.23). Расчетным же путем получить эту зависимость весьма затруднительно, так как расчеты, как было отмечено, окажутся связанными с целым рядом неопределенностей.

Рассмотрим эти вопросы подробно, используя принятую нами систему моделирования шероховатости в виде правильных пирамид

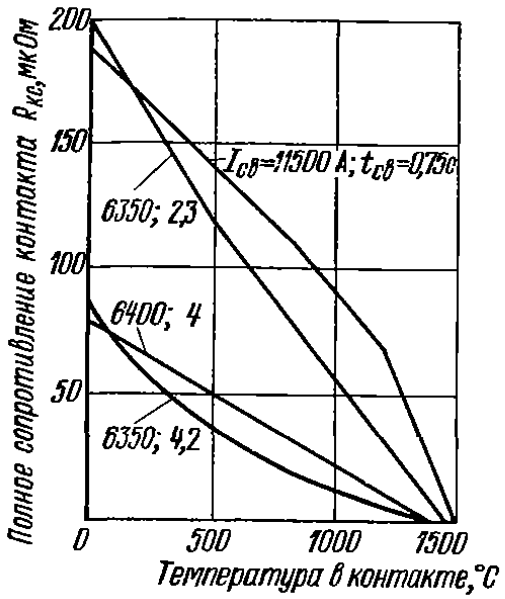


Рис. 1.22. Изменение полного сопротивления стыкового контакта от температуры в плоскости контакта (зависимости построены по осциллограммам $U_к$, $I_{св}$ и $T_к$)

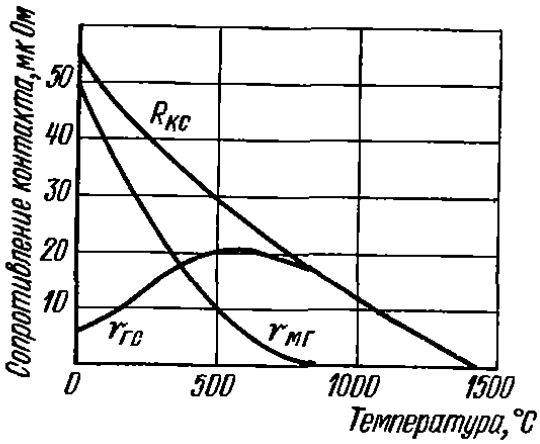


Рис. 1.23 Расчетно-графическое определение составляющей по зависимостям, приведенным на рис. 1.22, и по формуле (1.72) (стыковое соединение стержней диаметром 1,2 см)

с квадратным основанием. Если единичная пирамида деформируется в контакте с плоскостью, то ее электрическое сопротивление согласно формулам (1.65) и (1.68) будет равно (см. рис. 1.3).

$$r_{ед} = \rho_\Delta f/(ay). \tag{1.73}$$

При контактировании двух пирамид друг с другом

$$r_{ед} = 2\rho_\Delta f/(ay). \tag{1.74}$$

Среднее значение

$$r_{ед} = (1 \div 2)\,\rho_\Delta f/(ay). \tag{1.75}$$

В этом выражении размеры f, a, y см. на рис. 1.3, ρ_Δ — удельное сопротивление металла пирамиды.

Формула (1.75) содержит, по крайней мере, три неопределенности: различные условия контактирования шероховатостей и неопределенность размеров пирамид (см. табл. 5 приложения).

Если все пирамиды по размерам условно считаем одинаковыми, то общее электрическое сопротивление контактирующих микропирамид таково:

$$r_{мг} = (1 \div 2)\,\rho_\Delta f/(nay). \tag{1.76}$$

Поскольку $nay = A_r$, то, используя формулу (1.15), находим:

$$nay = na^2\sqrt{1 - e^{-X}} = A_c\sqrt{1 - e^{-X}};$$

$$r_{мг} = \frac{(1 \div 2)\,\rho_\Delta f}{A_c\sqrt{1 - e^{-X}}}. \tag{1.77}$$

Удельное сопротивление металла пирамид определяется [7] так:

$$\rho_{\Delta} = \rho_0 \left[(1 + \alpha T) + \frac{a}{\Delta} e^{p/\sigma_т} \right], \qquad (1.78)$$

где $p/\sigma_т$ — отношение давления, действующего на контурную площадь контакта, к пределу текучести сильно наклепанного металла. Формула (1.78) показывает, что величина ρ_{Δ} тоже вносит в расчет значительную неопределенность. Практически эта характеристика во много раз больше удельного сопротивления самого металла деталей: для металла, зачищенного наждачным кругом, — в десятки раз, для холодного проката — в тысячи раз.

Все неопределенности, содержащиеся в формуле (1.75), показывают, что практические расчеты микрогеометрического внутреннего сопротивления контакта по формуле (1.77) возможны только с помощью ЭВМ. Однако существующая технологическая практика пока что таких задач перед технологами не ставит. И тем не менее формулы такого типа, как (1.77), необходимо иметь в виду и технологу, поскольку формулы показывают достоверную теоретическую связь многих переменных, определяющих и поясняющих нестабильность начальных сопротивлений контакта.

Рассмотрим, как формула (1.77) отображает процесс деформации пирамид шероховатости и тем самым процесс изменения их электрического сопротивления. При полном смятии пирамиды, т. е. превращении ее в параллелепипед, $f = \Delta/3$. Относительная деформация при этом, согласно определению (1.3), (1.4), $f = \Delta(1 - \varepsilon)$, тогда $\varepsilon = 2/3$.

Полное смятие всех пирамид дает следующий результат:

$$r_{мг} = \rho_{\Delta}\Delta(1 \div 2)/(3A_c). \qquad (1.79)$$

Эта формула относится к тому конечному моменту деформации пирамид, когда все они как геометрические фигуры исчезли и создали сплошной слой деформированного металла толщиной от $\Delta/3$ до $2\Delta/3$ (рис. 1.24, *а* и *б*). С этого момента в контакте двух деталей активным сопротивлением становится именно этот слой, а не группа контактирующих микропирамид.

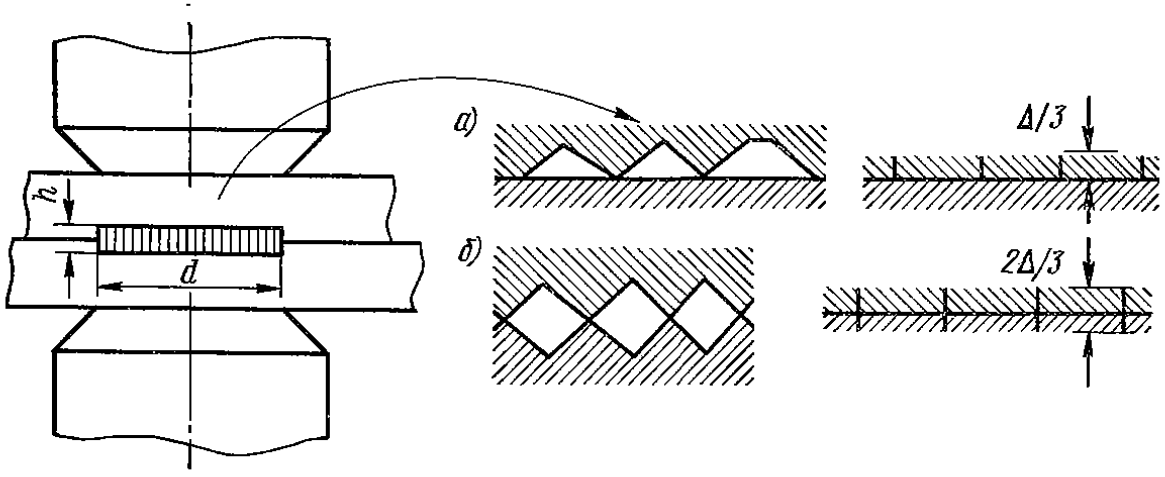


Рис. 1.24. Схема деформации пирамид шероховатости при точечной сварке и формирование из них расплавленного диска высотой $h = (1/3 \div 2/3)\Delta$

Изменение высоты пирамиды f в процессе ее деформации определяется так:

$$f = \frac{\Delta}{1 + \frac{y^2}{a^2} + \frac{y}{a}} = \frac{\Delta}{1 - e^{-X} + \sqrt{1 - e^{-X}}}. \qquad (1.80)$$

При $X = 4$ практически $e^{-X} \to 0$; $\sqrt{1 - e^{-X}} \to 1$ и $f = \Delta/3$.

Рассматривая деформацию пирамид как процесс ударного осаживания, можно из равенства (1.32) определить для любой единичной пирамиды

$$T_\Delta = \eta\varepsilon^2/(6knt). \qquad (1.81)$$

Формула показывает неограниченную возможность нагрева деформируемой пирамиды при достаточно высокой скорости ее деформации. Если учесть определение (1.5), то формулу (1.81) можно переписать так:

$$T_\Delta = \frac{\eta p^{2/\nu}}{6knt\,(p_{\text{с. д}} b)^{2/\nu}}. \qquad (1.82)$$

Она показывает, как влияет характер шероховатости на температурные вспышки в плоскости контакта при ударном сдавливании деталей. До сих пор в технологии контактной сварки никто не принимает в расчет бесспорный факт возникновения вспышек температуры в плоскости контакта. Никакая точечная машина не прикладывает давление электродов медленно, статически. Давления прикладываются безусловно и во всех случаях ударно. Отсюда практический вывод: наиболее достоверные измерения контактных сопротивлений получаются осциллографированием процесса сваривания точки непосредственно на точечной машине. Измерение контактных сопротивлений на каких-либо отдельных приборах при статических давлениях не соответствует реальной действительности.

Для контактной точечной сварки все понятия о полном сопротивлении контакта и его составляющих заметно усложняются по

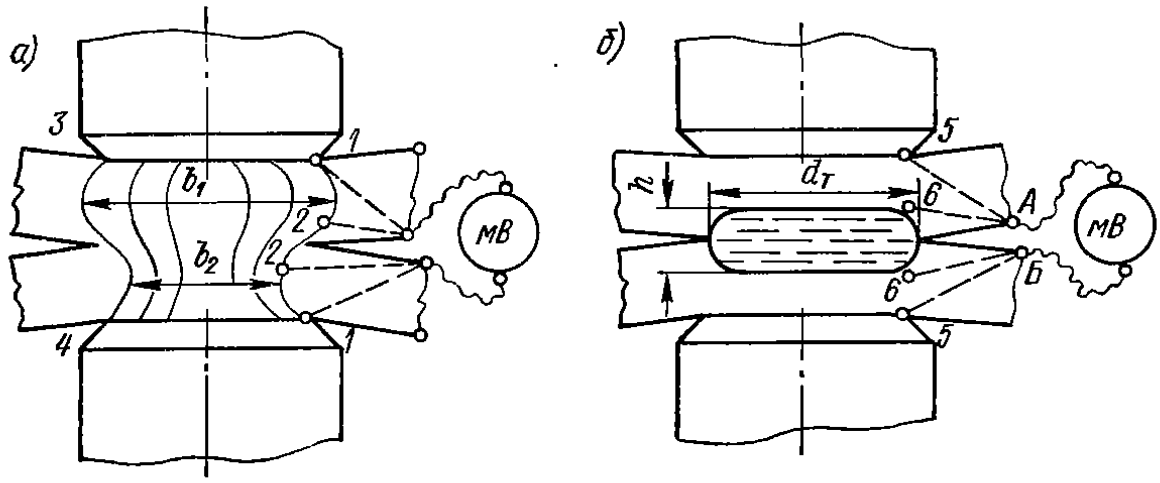


Рис. 1.25. К измерению падения напряжения на свариваемом контакте при точечной контактной сварке

сравнению с контактами стыковыми. Здесь требуются дополнительные пояснения, и притом достаточно подробные. Прежде всего уточним, что мы измеряем при точечной сварке, если речь идет о сварке деталей и шероховатых, и не свободных от оксидных наслоений. В этом общем случае полное сопротивление контакта можно записать равенством, аналогичным (1.64), но только с индексом, указывающим на точечную сварку:

$$R_{кт} = r_{гт} + r_{мг} + r_{пл}. \qquad (1.83)$$

Для измерения величины $R_{кт}$ к свариваемым деталям присоединяем милливольтметр. Допустим, что присоединяем его к точкам *А*, *Б* (рис. 1.25, *б*). Как уже отмечалось ранее, сварочный ток, пронизывая детали, займет объем, представляющий собой некоторую фигуру, очерченную линиями *1—1—3—4*. На рис. 1.25, *а* показано, что линии тока могут растекаться на какое-то расстояние (верхний лист), но могут и быть сжатыми. Так или иначе, но милливольтметр, присоединенный к точкам *А*, *Б*, будет снимать с токоведущей фигуры *1—1—3—4* некоторое падение напряжения не только с плоскости контакта, т. е. не только с точек *2—2*, но и с точек *1—1*, поскольку сам свариваемый металл — это тоже часть проводниковой цепи милливольтметра. Другими словами, милливольтметр на схеме 1.25, *а* реагирует на все искривления линий сварочного тока. Следовательно, он точно фиксирует всю сумму падения напряжения на составляющих, входящих в формулу (1.83), т. е. позволяет определить действительное значение $R_{кт}$. Для холодного контакта, т. е. в момент включения сварочного тока, эту величину можно отмечать еще дополнительным нулевым индексом $R_{кт0}$. Таким образом, видно, что применение милливольтметра не позволяет измерить отдельно составляющую $r_{мг}$. Мало того, она вообще не может быть отдельно измерена с помощью моделей вроде, например, набора шайбочек, поскольку любая модель, отличающаяся от реальных свариваемых деталей, нарушает и геометричность, и деформационное подобие в самом контакте.

Рассмотрим теперь, что же измерит милливольтметр в момент формирования расплавленного ядра сварной точки (рис. 1.25, *б*). Как видно, и в этот момент от точек *А* и *Б* как бы идут измерительные провода *А—5*, *Б—5*, *А—6* и *Б—6*. Поэтому прибор снова регистрирует усредненное значение падения напряжения на свариваемых деталях. Однако в этот момент оформления расплавленного ядра между точками *6—6* оказывается включенным металл с удельным сопротивлением, характерным для точки плавления, которое много выше, чем у твердого металла. Следовательно, какие бы искривления линий электрического тока ни сохранялись в слоях *5—6*, главным элементом сопротивления оказывается слой *6—6*, т. е. расплавленное ядро. Таким образом, в момент выключения тока полное сопротивление контакта превращается в сопротивление расплавленного ядра сварной точки, т. е.

$$R_{кт} \approx r_{т}. \qquad (1.84)$$

Этот вывод проверен многолетней практикой и, таким образом, электрическое сопротивление ядра сварной точки в момент выключения тока можно определить достаточно точно. Моделируя ядро как цилиндр диаметром $d_т$ и высотой h (см. рис. 1.25, *б*) и полагая удельное сопротивление соответствующим точке плавления металла $\rho_т$, можем написать:

$$r_т = 4\rho_т h/(\pi d_т^2). \qquad (1.85)$$

Эта величина будет играть существенную роль в дальнейших технологических расчетах.

Обратимся теперь к типовым зависимостям $R_{кт}$ от времени при точечной сварке, одна из которых представлена на рис. 1.26. Для чистых металлических поверхностей эта зависимость представлена кривой *2*, для поверхностей с заметным слоем оксидной пленки — кривой *1*. В обоих этих случаях при правильном программировании сварочного тока может быть получена сварная точка одного и того же размера, соответственно чему и конечное значение $r_т$ будет одинаковым.

Построив по данным типовых осциллограмм зависимость $R_{кт}$ от температуры в плоскости контакта, получим типовую кривую, показанную на рис. 1.27 (для точечной сварки Ст3 толщиной 4 + 4 мм). Здесь вычисление составляющей $r_{гт}$ нельзя вести с такой же уверенностью, как это делалось для величины $r_{гс}$ при стыковой сварке. Размер области растекания b_1 (см. рис. 1.25, *а*) или b_2 электрического тока в металле — величина переменная не только в зависимости от геометрических размеров, но и от физических свойств металла в данный момент. О величине $r_{гт}$ можно говорить только в общем виде и с некоторым приближением. Однако снова можно повторить, что и это понятие весьма полезно не так для расчетов, как для более полного понимания физического смысла протекания сварочного тока в свариваемых деталях.

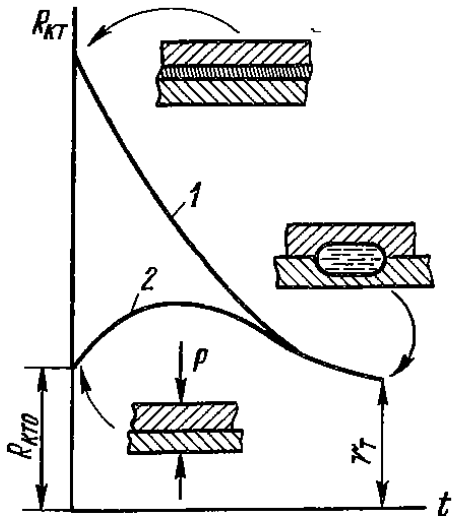


Рис. 1.26. Изменение полного сопротивления контакта при точечной сварке, по данным типовых осциллограмм

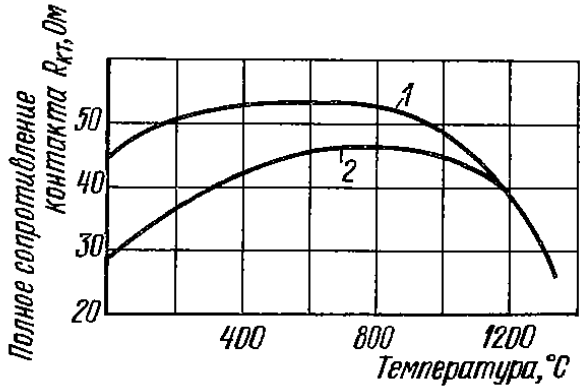


Рис. 1.27. Типовая кривая изменения полного сопротивления контакта при сварке стальных листов в зависимости от температуры, измеренной на краю ядра сварной точки:
1 — $I_{св}$ = 10 кА; *2* — $I_{св}$ = 14,5 кА

В результате можно сделать следующий вывод.

1. И экспериментальные, и расчетные определения значений электрических сопротивлений холодных контактов любой конструкции представляют собой весьма неопределенные характеристики. Ориентироваться на них в технологических расчетах — это значит мириться с заведомыми, почти во всех случаях нетерпимыми неточностями.

2. Ценность теоретических расчетных формул в том, что они показывают отчетливые взаимосвязи главных переменных, определяющих не только статические состояния металлических свариваемых контактов, но и, самое главное, динамику контактирования на всем протяжении процесса сваривания контакта.

3. Для точечной сварки все расчетные соображения по свариваемому контакту весьма рационально ориентировать на электрическое сопротивление контакта в момент выключения тока, что численно с достаточной точностью определяется электрическим сопротивлением расплавленного ядра, моделируемого как цилиндр диаметром $d_т$ и высотой h.

Вопросы нестабильности сопротивлений начальных холодных контактов еще раз будут рассмотрены в дальнейшем, когда речь пойдет о программировании режимов точечной сварки. Там же будут рассмотрены и вопросы полярности контактных сопротивлений, а также характеристики электрических несвариваемых контактов.

1.5. Взаимодействие механической и электрической энергии с металлом при сварке

До сих пор в описаниях технологии контактной сварки преобладает констатация чисто внешних, явно видимых и легко измеряемых переменных: это осадочное давление, сила сварочного тока и время его действия. Такого рода макромасштабные переменные и записывались в технологические рекомендации. Однако всякий такой параметр и каждый макромасштабный результат определяется, формируется и, по сути дела, целиком зависит от множества тех физических процессов в микромире, которые технологу не только нельзя измерить, но и как-то ощутить. Значит, для глубокого понимания процесса технолог должен получить представление, хотя бы в самом грубом приближении, о физической картине явлений, происходящих при сварке в металле. Все сварочные процессы являются энергетическими не только с внешней, легко наблюдаемой стороны. Формирование сварного соединения — это во всех случаях внутренняя, микромасштабная, физическая энергетика. Для контактной сварки особый интерес представляют два вида энергии: механическая и электрическая. К настоящему времени программирование электрической энергии доведено в контактных машинах до самых высоких степеней совершенства. Механической энергии отводилась роль второстепенная. Сейчас

этот факт уже становится препятствием для создания новых способов сварки. Сварочная технология в современных условиях может использовать механическую энергию в каких угодно количествах, по любой программе ее действия.

Рассмотрим конкретный пример — стыковой контактной сварки. Для осадки нагретых стержней используют некоторую осадочную силу P, которая и обеспечивает на пути h энергию осадки. Осадка производится достаточно быстро, чтобы считать, что справедливо равенство

$$Ph = \gamma c S h T_{\text{ср}},$$

где γc — теплосодержание единицы объема металла, отнесенное к градусу Цельсия; S — площадь поперечного сечения свариваемых стержней; $T_{\text{ср}}$ — средняя температура, какую получает весь нагретый металл за счет энергии осадки Ph.

Проведя сокращение, равенство можно переписать так:

$$p = \gamma c T_{\text{ср}}.$$

Для стали Ст3, например, чаще всего рекомендуется величина энергии осадки $p = 50$ Дж/см^3. При $\gamma c = 5$ Дж/(см$^3 \cdot$ °С) нагретый объем стержней получит в среднем температурную добавку за счет энергии осадки не более 10 °С. Становится удивительным, зачем же вообще эта осадочная операция с ее 10-градусной добавкой температуры.

Для оценки важности нагрева за счет осадочной операции следует рассмотреть, чем заканчивается операция осадки по самой плоскости контакта. Осадочная осевая сила в плоскости контакта превращается в радиально расходящуюся, вызывая радиальный сдвиг металла в плоскости контакта. И вот этот сдвиговый эффект, завершающий любой процесс сварки давлением, и есть тот необходимый энергетический, но уже кристаллически микромасштабный всплеск энергии. В дальнейшем будет показано, какие ощутимые температурные импульсы в масштабах элементарных кристаллов создают сдвиговые эффекты, чем вообще завершаются все процессы сварки давлением.

Рассмотрим обычный процесс стыковой сварки несколько подробнее с учетом физического воздействия на свариваемые детали каждого вида энергии. Стержни неравномерно нагреты, волна теплопроводности направлена от свариваемого контакта к зажимным губкам, звуковая волна от механической осадочной силы направлена в обратную сторону — от губок к плоскости контакта. Обращается внимание на то, что в описании действия двух видов энергии приходится переходить на волновой язык. Это вызвано тем, что все реальные частицы кристаллической структуры (атомы и свободные электроны) находятся в непрерывном колебании. Этот факт определяет непрерывный волновой поток энергии от уровней большого энергетического возбуждения к меньшим. Реальные частицы (атомы, свободные электроны) обладают не

только переменной энергией, но и переменной массой. Кроме реальных частиц признаны действующими в кристалле и квазичастицы. Первая из них — фотон — частица электромагнитной (в том числе лучевой) энергии. Частица эта может обладать любой энергией и, следовательно, любой частотой колебаний. Фотон в области сварки сегодня уже очень распространенный «работник», о котором сейчас говорят, имея в виду лазерную технологию.

Однако волновое поле в металле создает и механическая энергия. Эти поля в зависимости от частот являются звуковыми, ультразвуковыми и гиперзвуковыми. Вполне естественно было признать, что для звуковых волновых полей должна существовать своя элементарная квазичастица — носитель энергии. Эту квазичастицу назвали ф о н о н. Она является элементарным квантом звуковой энергии, т. е. энергии механических колебаний. Согласно идеям волновой (квантовой) механики, каждой движущейся микрочастице соответствует определенная волна. И, наоборот, любой волновой поток мы можем представлять как движение массы частиц реальных и квазичастиц.

Если признать существование фононов, то любой металл, да и вообще твердое тело, иногда можно рассматривать как объем, наполненный движущимися идеальным «газом» фононов с различной энергией. Понятие газа в данном случае такое же условное, какое иногда допускают для понятий «электронного газа», реже для металла и очень часто для полупроводников. Разница между фононным и обычным газом реальных частиц весьма существенна и очень интересна. В каждом замкнутом сосуде число обычных газовых частиц неизменно. Что же касается фононного газа, то в любом металлическом объеме посредством энергетического и, в частности, механического воздействия на этот металл можно создать любое число фононов, с любыми энергиями каждого.

Представления о фотонных (лазерных) процессах для нас давно уже стали привычными и понятными. Нас не удивляет, как фотонные потоки лазерного (квантового) луча обрабатывают и металлические, и неметаллические детали. Фонон для нас — квазичастица, удобная для понимания многих механических и тепловых процессов при сварке. Первый закон термодинамики, особенно хорошо изученный для макроскопических масштабов, определяет привычный кругооборот энергий: механическая энергия превращается в тепловую. Этот же закон природы можно формулировать и для микромасштабов, используя понятие фононов.

Фононная волна или фононный поток обладает направленной энергией. Эту энергию мы создали в металле механическим ударом по нему с той или иной скоростью. Фононный волновой поток передает энергию от кристалла к кристаллу. Фонон (подобно фотону) электрическим зарядом не обладает. Соответственно этому фонон может сталкиваться с любой заряженной частицей: электроном, протоном, ионом. При каждом столкновении фонон передает свою энергию и исчезает даже как квазичастица. Фононная волна пере-

носит механическую энергию, передает ее реальным частицам кристалла и обеспечивает увеличение энергии этих реальных частиц, что в общей массе частиц мы и определяем понятием температуры.

Возвращаясь теперь к нашему конкретному примеру стыковой сварки, рассмотрим его уже с позиций физических понятий. Не касаясь пока самого процесса электронагрева, рассмотрим конечный результат нагрева стержней и их осадки, т. е. переход механической энергии в тепловую. Вопрос теперь можно поставить так. Если по старой привычной технологии стержни в плоскости контакта нагревали до высокой, может быть близкой к плавлению температуры, то тем самым доводили частицы кристаллической решетки приблизительно до таких частот колебаний относительно их равновесного положения в кристалле:

Температура металла, °С	700—800	800—900	900—1150
Атомная частота, Гц	$(3{,}8 \div 4)\ 10^{13}$	$(4 \div 4{,}6)\ 10^{13}$	$(4{,}6 \div 5)\ 10^{13}$

Как видно из этих данных, чистый нагрев металла не очень сильно повышает энергию частиц кристаллической решетки. Нагрев до плавления, т. е. до белого свечения металла, создает атомную частицу с частотой только до $7{,}6 \cdot 10^{13}$ Гц. А вот что касается механической энергии, то она посредством мощного ударного потока фононов может довести частоту колебаний атомов до 10^{15} Гц, т. е. даже превысить частоту ультрафиолетовой активации. Такие именно картины характерны для сварки взрывом.

Что же касается рассматриваемого примера контактной стыковой сварки, то, как было подсчитано, среднее значение температуры нагретого металла от действия механической осадки ничтожно. Но среднее значение относилось к довольно большому объему нагретого металла и расчет этой средней температуры никак не отобразил внутреннюю физическую картину в микроскопическом масштабе. А в этом масштабе происходят весьма интересные процессы: осадочная энергия создает два волновых, встречных фононных потока. Эти волновые потоки, кстати сказать нелинейные, тормозятся, сталкиваясь в плоскости контакта и дают концентрированный энергетический всплеск именно по плоскости сваривания. Этот энергетический всплеск и обеспечивает сдвиговый эффект, который в масштабе тонкого слоя элементарных кристаллов создает значительно больший температурный импульс, чем среднее значение температуры. Разумеется, чем меньше скорость осадочной операции, тем слабее фононный поток, ею созданный. При ударно-стыковой сварке с использованием разряда конденсатора слой кипящего металла выбивается из плоскости контакта и только за счет ударно-волнового всплеска фононной энергии удается безупречно сваривать самые кристаллически неродственные металлы.

Приведем некоторые факты из жизни и взаимодействия в металле реальных частиц и квазичастиц. Физики о металле иногда

говорят так: металл — это сосуд, наполненный электронами и фононами. Разница только в том, что электронов в одном кубическом сантиметре всегда только около 10^{23} шт., а фононов можно создать сколько угодно, независимо от числа атомов металла. Такое понимание физического существа металла может быть принято с добавлением, что никакая его частица никогда не находится в покое. Они все время обмениваются друг с другом своими мгновенными энергиями. И здесь уместно обратить внимание на энергетическое взаимодействие микрочастиц для понимания значений самых распространенных при сварке физических констант. Особенно часто при сварке приходится говорить о коэффициентах теплопроводности, температуропроводности, электропроводности, коэффициенте аккумуляции теплоты. Все эти коэффициенты так или иначе входят в расчетные дифференциальные или алгебраические уравнения. Следует особо подчеркнуть, что и расчетные уравнения, и расчетные физические константы, какими заполнена до сих пор вся сварочная литература, взяты от металлургов и электриков еще прошлого века.

Измерение всех констант, о которых идет речь, проводилось посредством медленных нагревов в печах, т. е. в условиях, категорически отличающихся от современных импульсных ударных и просто скоростных вложений энергии в металл. Рассмотрим, например, коэффициент теплопроводности меди. По всем справочным таблицам среднее его значение от холодного состояния до точки плавления равно $\lambda = 3{,}35$ Вт/(см·°С). Для процесса же сварки взрывом $\lambda = 11{,}17$ Вт/(см·°С), т. е. в 3,3 раза больше. Почти во столько же раз больше и коэффициент температуропроводности a. Эта разница объясняется физической сущностью самого понятия теплопроводности. Она определяет процесс волнового движения энергии, какой обеспечивается энергетическими зарядами фононов и электронов. Теплопроводность и есть волновой энергетический фононно-электронный поток от места приложения любого вида энергии к зоне спокойно колеблющихся частиц кристаллической решетки. Поскольку каждый вид энергии превращается в тепловую, а мерой теплоты массы движущихся частиц принято называть температуру, то все и привыкли к макроскопическим представлениям: теплота распространяется от горячего конца к холодному. Физически это значит, что от горячего, т. е. энергетически активированного конца стержня, идет фононно-электронная волна, активируя по дороге все встречные частицы и теряя на них постепенно весь свой энергетический заряд. А заряд этот все тому же стержню можно сообщать посредством самых различных видов энергии по любой программе действия этих энергий. Но соответственно виду энергии и теплопроводность будет в основном фононной природы, электронной или же фононно-электронной. Последняя форма теплопроводности является самой распространенной для реальных металлов. Электронная теплопроводность характерна, как правило, для чистых металлов. В реальных металлах

с их многочисленными посторонними атомами и большим числом микродефектов длина свободного пробега фононов и электронов приблизительно одинакова. Отсюда вклад фононов и электронов в процесс теплопроводности равновелик. Здесь, кстати, уместно определиться в понимании физической сути пластической деформации металлических деталей: любая пластическая деформация нарушает стабильную до того электрическую структуру металла. Электрическую структуру непрерывно поддерживают не относительно тяжелые и относительно инертные атомы решетки, а свободные электронные плотности, помещающиеся в кристаллах, блоках и даже кристаллитах. Любое установившееся электрическое состояние в каждом микрообъеме пластическая деформация разрушает. Электронные плотности, воспринимая импульс механической энергии в виде фононной волны, стремятся рассредоточить повышенный электрический потенциал и вновь создать новое электрическое и в связи с этим — микроструктурное равновесие. Но это происходит только в момент прекращения действия механической энергии. Таков процесс разрядки импульса механической энергии, действующего на свариваемый контакт. Нагрев контакта только помогает, ускоряет процесс кристаллической, как видно всегда по природе электрической, стабилизации. Отсюда можно сделать твердое заключение, что ни электронные плотности, ни фононные потоки не подчиняются табличным рекомендациям и ограничениям, какие во всех книгах определяются величинами осадочных сил. И электронные, и фононные волновые процессы в зонах свариваемых контактов могут действовать в любых соотношениях друг с другом, но их действие никогда нельзя разделить.

Таким образом, с позиций физической сущности любого процесса сварки, в котором действует только лишь одна механическая энергия, нельзя вести о ней речь только с понятий механической силы. В самом металле эта механическая сила превращается в активатор электрических и эквивалентных тепловых эффектов.

Теперь рассмотрим физический смысл процесса электрического нагрева того же нашего стыкового соединения, о котором шла речь выше.

При малых токах слабое электрическое поле, действующее на сравнительно тяжелые атомы, неспособно обеспечить достаточно сильный сварочный нагрев. Однако токи большой сварочной силы уже настолько активируют электронные плотности (электронный газ), что их направленное перемещение начинает захватывать даже связанные с ними атомы. И вот эффект хотя и волнового процесса, но идет уже частично с переносом вещества. Сильные токи обеспечивают иногда и весьма заметную электродиффузию, т. е. электроперенос. Джоулево тепловыделение при больших плотностях тока заметно отличается от того же эффекта при токах малой плотности. Удельное сопротивление за пределами точки плавления резко увеличивается. Так, в частности, для медных проволок

удельное сопротивление в момент начала плавления равно 8 мкОм·см, в конце плавления оно возрастает до 20 мкОм·см, а к началу испарения становится близким к 40 мкОм·см.

Аналогичное изменение проводимости известно и для сталей, чего нельзя не учитывать при стыковой и точечной сварках. Для стыковой сварки — это эффект взрыва перемычек при оплавлении, для точечной — это выплески металла из зоны плавления ядра сварной точки.

По-видимому, вполне уместно перед рассмотрением вопросов теории не только механического, но и свариваемого контакта сформулировать некоторые общетеоретические выводы о взаимодействии одновременно механической и электрической энергии с металлом, независимо от того, о каком металле идет речь. Прежде всего привычное и сотни раз в день повторяемое в цеху понятие «температура металла» иногда полезно заменить понятием «активация металла». В последнее понятие входят все способы нагрева и тем самым все виды энергии, какие можно вложить в зону свариваемого контакта.

Как было показано выше, и механическая, и электрическая энергии в кристаллах делают одну и ту же сложную работу: повышают частоту колебаний частиц решетки, обеспечивают волновое движение энергии от кристалла к кристаллу, создают передвижение частиц в виде отдельных их перескоков или групповое, дислокационное движение вещества. Механизм действия электрической энергии — это возбуждение волнового процесса электронных плотностей свободных электронов. Через воспринятый ими энергетический заряд активируются уже частицы кристаллических организаций, обеспечивая тем самым все виды движения энергии по трем степеням свободы, с разными частотами. Механическая энергия не может непосредственно воздействовать на электронные плотности свободных электронов. Она создает волновые фононные потоки, а фононы с их любой, самой высокой энергией активируют электронные плотности, исчезая в момент передачи электрону своего энергетического заряда.

Как видно, суммировать электрическую и механическую энергию в зоне свариваемого контакта технолог может неограниченно, комбинируя эти виды энергии в количественном соотношении.

Несмотря на довольно грубые упрощения изложенных здесь физических процессов, наблюдающихся в металле при сварке, на их основе можно сделать практические выводы. Самый главный из них: металл различает все виды энергии, какие с ним взаимодействуют. Однако в макроскопическом масштабе (внешне) на вложение в зону свариваемого контакта любой энергии металл отвечает однозначно — нагревом. Это и есть суть первого закона термодинамики. Но если технолог не будет различать видов энергии, ее количества в контакте и программы введения энергии, то это уже в современных условиях недопустимо.

Еще не забыто время, когда технологические рекомендации сводились к указаниям: номер ступени включения такой-то, время

давления ногой на педаль такое-то. На смену этой примитивности пришли таблицы, в которых стали уже указывать: пределы его сварочного тока, силу сжатия и время включения. Отрицать необходимость таких рекомендаций для цехового мышления пока нельзя. Нужно подчеркнуть недостаточность таких таблиц для понимания сущности процесса сварки. Табличные данные, да еще с классификациями, например, больших давлений, средних, малых, импульсных — это уже преграды для творческой мысли технолога и конструктора.

Изложенная выше физическая картина взаимодействия металла и энергии показывает, что нет никаких пределов для введения в контакт любой одиночной энергии или пропорционального суммирования в контакте каких угодно энергий. Всякое программирование энергий, рассчитанное технологом, должно приводить к главной цели: контакт должен быть сварен, и сварное соединение должно удовлетворять самым высоким прочностным показателям для данной конструкции.

Глава 2

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПРОЦЕССОВ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

2.1. Элементы теории потоков применительно к контактиой сварке

Тепловые, электрические и диффузионные процессы в металле могут математически рассматриваться как потоки энергии, иногда как потоки частиц или даже как процессы массопереноса.

Для контактной сварки особое значение имеют некоторые характерные поточные дифференциальные уравнения. Одно из них — уравнение теплопроводности Фурье:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\lambda}{\gamma c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \qquad (2.1)$$

Полностью подобным этому уравнению является уравнение Фика, описывающее процессы диффузии и массопереноса

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \qquad (2.2)$$

где C — концентрация вещества в исследуемом объеме; D — коэффициент диффузии, или коэффициент массопереноса.

Дальше следуют два уравнения Максвелла: одно определяет электрическое поле в металле

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2}; \qquad (2.3)$$

другое — магнитное

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \frac{\rho}{\mu}\frac{\partial^2 B}{\partial x^2}, \qquad (2.4)$$

где E — электрический потенциал; ρ — удельное сопротивление среды; μ — магнитная проницаемость; t — время; x — координата; B — магнитная индукция в металле.

Следует подчеркнуть очень существенное обстоятельство. Электрический ток не может существовать без магнитного потока вокруг исследуемого проводящего участка. Основная и главная роль магнитного поля каждого проводящего участка — это сжатие линий протекающего электрического тока. Если речь идет о о токе по металлическому проводнику ограниченного сечения, например по стержню, то сжатие его магнитным полем хотя и существует, но оно недостаточно для сжатия линий электрического тока в стержне, а распространение тока по сечению ограничивается габаритными размерами стержня. Если же ток проходит между двумя полюсами по среде неограниченных размеров, и притом в любой среде — металлической, газовой или жидкостной, то магнитное поле не позволит растекаться линиям электрического тока на сколько-нибудь значительное расстояние. Этим определяется, например, существование электрической, в том числе сварочной дуги. Докажем это.

Давление магнитного поля, создаваемого протекающим током в пространстве проводящего участка на линии этого же электрического тока, определяется следующей формулой:

$$p_м = \mu H^2/(8\pi 10^7), \qquad (2.5)$$

где $p_м$ — давление, МПа; H — напряженность поля,

$$H = I/(\pi d), \qquad (2.6)$$

d — диаметр проводника, или диаметр круга растекания линий электрического тока. Преобразуя формулы (2.5) и (2.6), получим

$$p_м = \mu I^2/(8\pi^3 d^2 10^7). \qquad (2.7)$$

Если бы не существовало этого магнитного давления на пространство, занятое дугой, т. е. заполненное горячим газом и плазмой, то под влиянием внутреннего, газового давления ($p_{газ} = Lk\theta$) все частицы разлетелись бы в пространство. Число этих частиц, согласно числу Лошмидта, $L = 6{,}02 \cdot 10^{25}$ частиц/м^3, а давление определяется энергией $k\theta$. В действительности магнитное давление $p_м$ и газовое $p_{газ}$ уравновешиваются и получается общеизвестное соотношение

$$\frac{\mu I^2}{8\pi^3 d^2 10^7} = Lk\theta, \qquad (2.8)$$

откуда видна и причина подъема температуры в так называемой сжатой дуге.

Таким образом, невозможно отрицать эффект сжатия линий электрического тока в неограниченной газовой, даже немагнитной среде. Очень странно в связи с этим отмечать, что факт сжатия линий тока в неограниченной металлической, да еще и магнитной среде некоторые сварщики отрицают до сих пор. Это отрицание реальной действительности приводит иногда к весьма заметным технологическим просчетам.

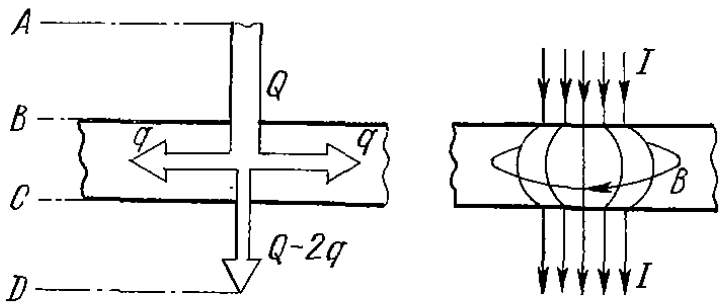


Рис. 2.1. Схемы, показывающие отсутствие подобия между тепловым потоком (слева) и электрическим током (справа)

Сравнивая уравнения (2.1)—(2.4), приходится заметить, что они отличаются друг от друга только физическими константами и природой потенциальных функций T, C, E и B. Формально, математически, уравнения полностью подобны. Это значит, что при одинаковости начальных и граничных условий решения конкретных задач обеспечиваются одними и теми же математическими функциями от координат и времени. Однако подобие — это не тождество, особенно для процессов физических, разных по своей природе. Для того чтобы внушить осторожность при использовании принципов подобия, достаточно рассмотреть два разных потока, движущихся по одной и той же модели (рис. 2.1). На участках AB по стержням ограниченных размеров оба потока (Q и I) движутся абсолютно подобно. Как только эти потоки вступают в пространство BC, т. е. в неограниченную металлическую пластину, электрический ток выходит из этой пластины в область CD таким же по величине, каким он и вошел в нее, какие бы искривления он ни претерпел при этом внутри пластины.

Что касается теплового потока Q, то в пластине он потеряет значительную долю своего потенциала $2q$ и выйдет из пластины значительно ослабленным. Таким образом, в отличие от стержня в пластине BC подобия между Q и I нет. Это и понятно: тепловой поток внутри пластины не сжимается никакими силами, а электрический ток сжат магнитным полем B. Как было показано, уравнение теплопроводности Фурье дает безразмерные критерии подобия: Фурье (1.42) и М. В. Кирпичева (1.44).

Уравнения электрического и магнитного полей также имеют критериальное число Максвелла

$$\mathrm{Ma} = \rho t/(\mu x^2). \qquad (2.9)$$

Для синусоидального переменного тока, поскольку $t = 1/f$,

$$\mathrm{Ma} = \rho/(\mu f x^2), \qquad (2.10)$$

где f — частота переменного тока.

Для многих практических электротехнических расчетов академик Л. Р. Нейман ввел несколько видоизмененный критерий, который он назвал символом,

$$\varkappa = \mathrm{Ne} = \frac{S}{u}\sqrt{\mu f/\rho}, \qquad (2.11)$$

где S — площадь поперечного сечения исследуемого проводника, u — периметр этого сечения.

Формулу (1.36) можно записать в общем виде

$$x = \xi\sqrt{at} = \xi\sqrt{\lambda t/(\gamma c)}. \qquad (2.12)$$

По аналогии с этой записью на основе формулы (2.9) правомерно сделать другую:

$$x = \xi\sqrt{\rho/(\mu f)}; \quad x = \xi\sqrt{\rho t/\mu}. \qquad (2.13); (2.14)$$

Если из формулы (2.12) видно, чему пропорциональна глубина проникания температуры, то формулы (2.13) и (2.14) показывают, чему пропорциональна глубина проникания электрического тока.

Для практических расчетов используют не полную глубину проникания тока, а только 0,63 от этого размера и называют ее эквивалентной глубиной проникания тока — $\delta_{экв}$.

Если измерять ρ в Ом·см, t — в с, а μ считать безразмерным числом из отношения

$$\mu = B/H, \qquad (2.15)$$

то численно $\delta_{экв}$ определяется по формуле

$$\delta_{экв} = 5000\sqrt{\rho t/\mu}$$

или для переменного тока

$$\delta_{экв} = 5000\sqrt{\rho/(\mu f)}. \qquad (2.16)$$

В дальнейшем магнитные величины B и H будут необходимы для расчетов. Их физический смысл сводится к следующему: напряженность магнитного поля электрического тока, проходящего по проводнику любого сечения, определяется через периметр этого сечения u

$$H = I/u. \qquad (2.17)$$

Следовательно, физический смысл понятия напряженности — это число магнитных линий, которое пронизывает воздушное пространство вокруг проводника.

Как известно, воздух немагнитен. Если же вокруг проводника вместо воздуха окажется магнитная сталь, то концентрация магнитных линий в ней получится во много раз большей, чем в воздухе. Такую концентрацию уже называют магнитной индукцией и обозначают символом B.

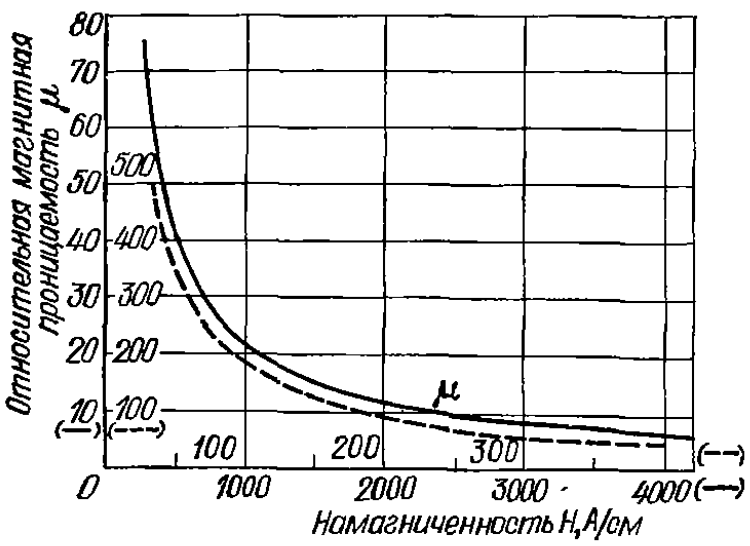


Рис. 2.2. Кривая $\mu = f(H)$ для стали Ст3

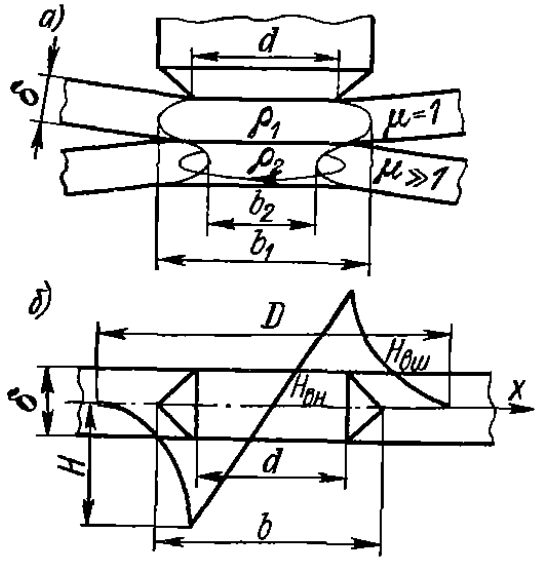


Рис. 2.3. Протекание тока по свариваемым деталям в зависимости от магнитных свойств металла

Таким образом, равенство (2.15) говорит о том, что абсолютная магнитная проницаемость μ представляет собой число, показывающее, во сколько раз магнитных линий в магнитной среде, окружающей проводник, больше, чем в том же объеме, если бы он был немагнитным.

На рис. 2.2 для иллюстрации этой картины представлены кривые $B = f(H)$ для стали Ст3 [для воздуха кривая изменения $B = f(H)$ суть прямая под углом 45°].

Рассмотрим теперь картины наиболее достоверного распределения электрического переменного тока по свариваемым деталям различной конфигурации при точечной сварке, что представляет наибольший интерес. На рис. 2.3, *а* показаны возможные распределения сварочного тока по толщине листов. В верхнем листе из немагнитного металла ($\mu = 1$) не создается большой концентрации магнитного потока вокруг сварочного тока, и его силовые линии могут растекаться на расстояние $b_1 > d$. Нижний лист из магнитного материала и здесь наблюдается магнитное сжатие тока: $b_2 < d$.

Если моделировать действительную эллипсоидально-сферическую область в металле, занимаемую током в виде усеченных конусов, то согласно схеме рис. 2.3, *б* можно написать следующее.

1. Внутренний магнитный поток при напряженности поля $H = I/(\pi d)$; $H_{вн} = H/2 = I/(2\pi d)$ определится так:

$$\Phi_{вн} = \mu I \delta d/(2\pi d2) = \mu I \delta/(4\pi). \qquad (2.18)$$

2. Внешний поток при $H_{вш} = \dfrac{I}{\pi x}$

$$\Phi_{вш} = \int_{d/2}^{D/2} \mu H_{вш}\, dx\, \delta = \frac{\mu I \delta}{2\pi} \ln \frac{D}{d}. \qquad (2.19)$$

3. Суммарный поток

$$\Phi = \Phi_{вн} + \Phi_{вщ} = \frac{\mu I \delta}{2\pi}\left(\ln\frac{D}{d} + 0{,}5\right). \qquad (2.20)$$

Этот суммарный поток создает в металле индуктивную противоэлектродвижущую силу

$$U = \frac{4{,}44\Phi f}{10^8} = \frac{4{,}44 I \delta \mu f}{2\pi 10^8}\left(\ln\frac{D}{d} + 0{,}5\right),$$

которая эквивалентна падению напряжения на индуктивном сопротивлении (IX).

Академик Л. Р. Нейман установил, что индуктивное сопротивление проводников любой формы определяется формулой

$$X = (0{,}84 \div 1)\,\varkappa R, \qquad (2.21)$$

где R — сопротивление проводника постоянному току; $\varkappa$ — критерий Ne по формуле (2.11). Если X определять в омах, то в критерий $\varkappa$ надо ввести соответствующий коэффициент, тогда критерий получит вид

$$\varkappa = \mathrm{Ne} = \frac{2}{10^4}\frac{S}{u}\sqrt{\mu f/\rho}. \qquad (2.22)$$

Это сопротивление конусов, которыми моделирует область распространения в металле тока, равно

$$R = 4\rho\delta/(\pi d b). \qquad (2.23)$$

Учитывая выражение (2.23), запишем

$$\left(\ln\frac{D}{d} + 0{,}5\right)\frac{4{,}44 I \delta \mu f}{2\pi 10^8} = IX \approx I\varkappa\frac{4\rho\delta}{\pi d b}.$$

Отношение S/u в данном случае

$$S/u = (\pi d^2/4)/(\pi d) = d/4.$$

Имея в виду формулы (2.16) и (2.22), определяем

$$\varkappa = \mathrm{Ne} = \frac{S}{u}\frac{1}{\delta_{экв}} = \frac{d}{4\delta_{экв}}. \qquad (2.24)$$

Соответственно

$$\left(\ln\frac{D}{d} + 0{,}5\right)\frac{4{,}44 I \delta \mu f}{2\pi 10^8} \approx I\frac{2}{10^4}\sqrt{\frac{\mu f}{\rho}}\frac{d}{4}\frac{4\rho\delta}{\pi d b}.$$

Произведя сокращения и учитывая выражение (2.24), окончательно получаем

$$b = \delta_{экв}/[\ln(D/d) + 0{,}51]. \qquad (2.25)$$

Эта формула весьма существенна. Она показывает, что размер области растекания тока b может быть в действительности и больше и меньше d в зависимости от электрического сопротивле-

ния металла при данной температуре и его магнитной проницаемости μ. Поскольку обе эти характеристики в процессе сварки переменны, то и размер b нестабилен. Формула (2.25) правильно отображает физический смысл токораспределения по сечению металлических листов. Подобно тому как электрический ток, пробивая воздушный зазор между электродами, в первое мгновение концентрируется по стриммеру, совпадающему с осевой линией, он также пронизывает массу металлического листа. Ток возникает по осевой линии электродов в виде тонкого шнура.

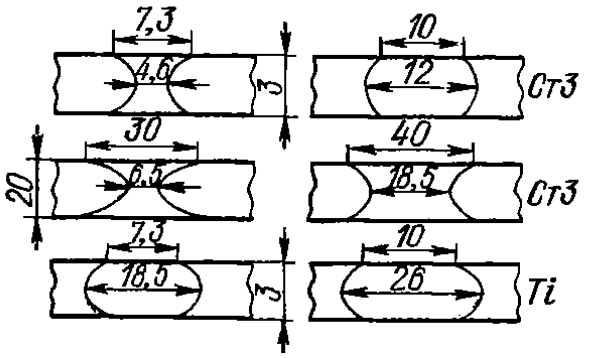


Рис. 2.4. Размеры растекання сварочного тока по стальным и титановым листам

Используем формулы этого параграфа для расчета путей протекания тока по листам разной толщины из магнитного металла (Ст3) и немагнитного титана.

Пример. Толщина свариваемых пластин из Ст3 3 + 3 мм. Диаметр ядра сварной точки предусмотрим равным $d_т = 10$ мм. Сварочный ток примем $I = 12\,000$ А. Сила сжатия электродов $P = 5750$ Н. Напряженность магнитного поля

$$H = 12\,000/(\pi \cdot 1 \cdot 10^{-2}) \approx 4 \cdot 10^{-5} \text{ А/м}.$$

Учитывая величину магнитного поля, по кривой намагничивания стали Ст3 (см. рис. 2.2) находим абсолютную величину относительной магнитной проницаемости $\mu \approx 10$.

Ширину свариваемой пластины примем $D = 40$ мм. При этих данных рассчитываем диаметр круга контактирования в момент включения, т. е. при холодном металле, согласно формуле (1.8),

$$d_0 = d_т \sqrt{1 - e^{-z}} = 7{,}3 \text{ мм}.$$

Размер b_0 по формуле (2.25) $b_0 = 4{,}6$ мм.

Линии тока сильно сжаты (рис. 2.4). В момент сваривания точки, когда удельное сопротивление металла вокруг ядра возрастает в несколько раз, а магнитная проницаемость становится равной единице, линии тока (рис. 2.4, правая часть) растекаются до размера $b = 12$ мм.

Произведя расчет по тем же формулам для сварки листов большой толщины $\delta + \delta = 20 + 20$ мм при $d_т = 40$ мм, $I = 60$ кА, $P = 100$ кН, $D = 100$ мм, получим $d_0 = 30$ мм, $b_0 = 6{,}5$ мм, $b = 18{,}5$ мм. Как видно, при больших толщинах стали Ст3 растекания тока до конца сварки нет вообще, а в металле он сжимается.

Для немагнитного титана, обладающего высоким удельным сопротивлением и в холодном, и в горячем состоянии, в течение

всего процесса сварки наблюдается растекание тока (рис. 2.4, низ).

В условиях производства никаких расчетов картин растекания или концентрации тока не производят. Рассмотренные здесь примеры имеют цель дать представление об очень сложной электротепловой динамике, которая имеет место не только по плоскости контакта, но и по толщине металла. Многие расчетные формулы часто имеют большое познавательное значение, показывая, от каких именно переменных величин и в какой их связи зависят электрические, тепловые и другие процессы при контактной сварке.

2.2. Электрический ток в свариваемых деталях и конструкциях

Для технолога первостепенный интерес представляет не только распределение сварочного тока в зоне свариваемого контакта, но, во многих случаях практики, и вдали от него. Для примера на рис. 2.5 и 2.6 показаны картины распределения токов при стыковой сварке колец и при многоточечной сварке листов.

Для борьбы с токами шунтирования при стыковой сварке используют два способа. Первый — для кольцевых деталей малого диаметра, но больших свариваемых сечений. Для них проектируют одновременную стыковую сварку двух стыков из двух полуколец. Второй способ пригоден для кольцевых изделий большого диаметра (бочки, колеса, бандажи). В этих случаях токи шунтирования можно свести до ничтожно малого значения, посредством разъемных дросселей (рис. 2.7). Если разъемный железный сердечник надет на кольца, то он становится одновитковым дросселем, через

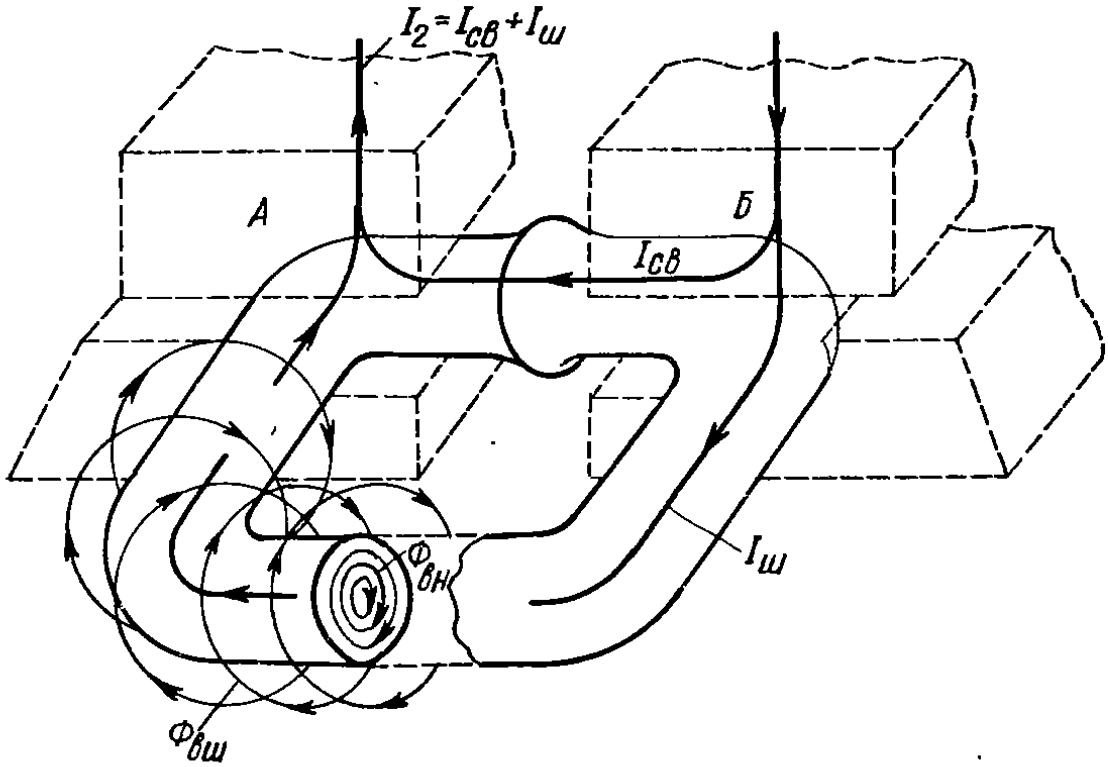


Рис. 2.5. Разделение вторичного тока I_2 на сваривающий $I_{св}$ и ток шунтирования $I_ш$ при стыковой сварке кольцевых изделий

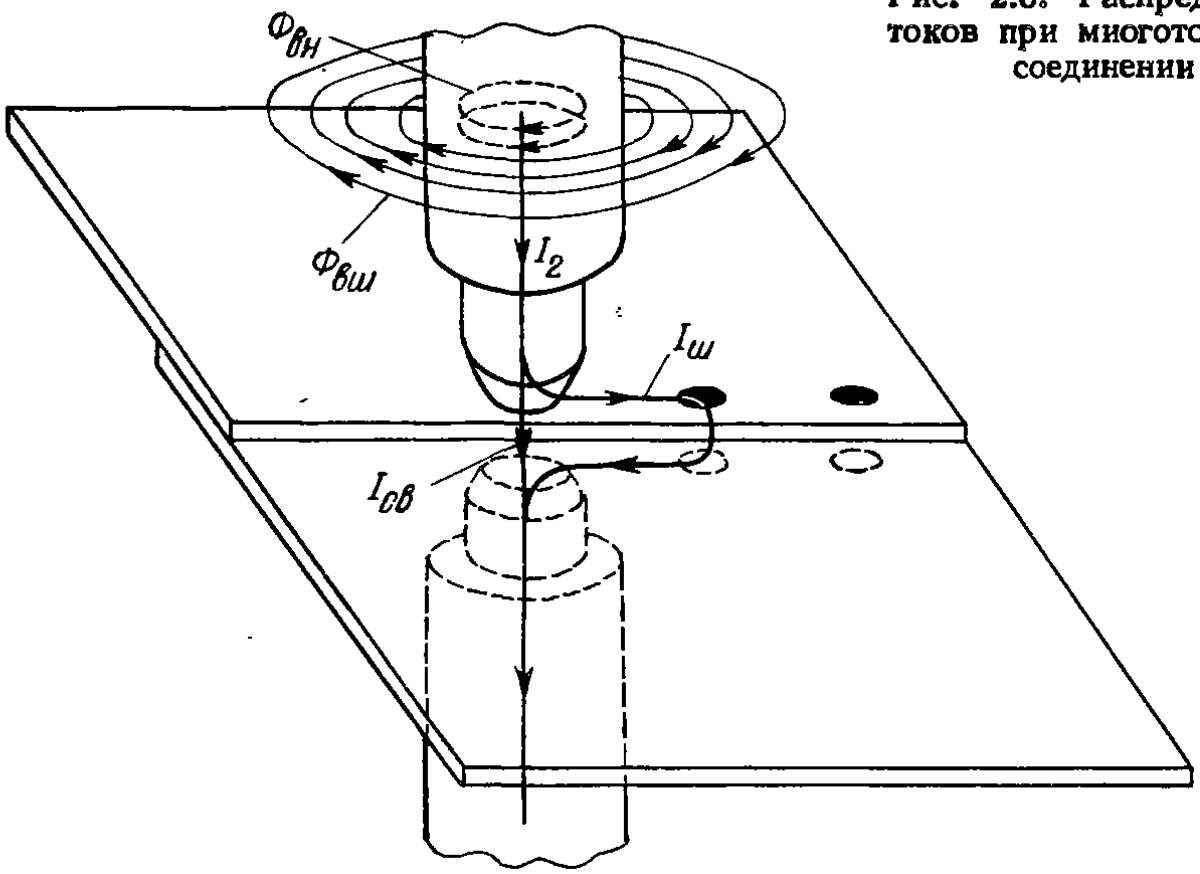


Рис. 2.6. Распределение токов при многоточечном соединении

который идет ток $I_ш$. Коэффициент самоиндукции такого дросселя определяется так:

$$L = 4\pi n^2 \mu S_ж / l_ж, \qquad (2.26)$$

где n — число витков ($n = 1$); $S_ж$ — площадь сечения активного железа сердечника; $l_ж$ — длина средней магнитной линии по сердечнику (рис. 2.7).

Если положить, что максимальная индукция, допустимая в сердечнике, $B = 1{,}8 \cdot 10^4$ Тл, то, поскольку

$$B = \mu H; \quad H = I/u,$$

получаем

$$\mu = 1{,}8 \cdot 10^4 u / I_ш, \qquad (2.27)$$

где $u = 2(h_э + \delta)$ — периметр проводящего контура ветви шунтирования.

При этом индуктивное сопротивление одновиткового дросселя

$$X_{др} = \omega L = \frac{2\pi f 4\pi 1{,}8 \cdot 10^4 u S_ж}{I_ш l_ж 10^9}.$$

Для нормальной частоты 50 Гц

$$X_{др} = \frac{72 S_ж 10^3}{I_ш} 10^{-6},$$

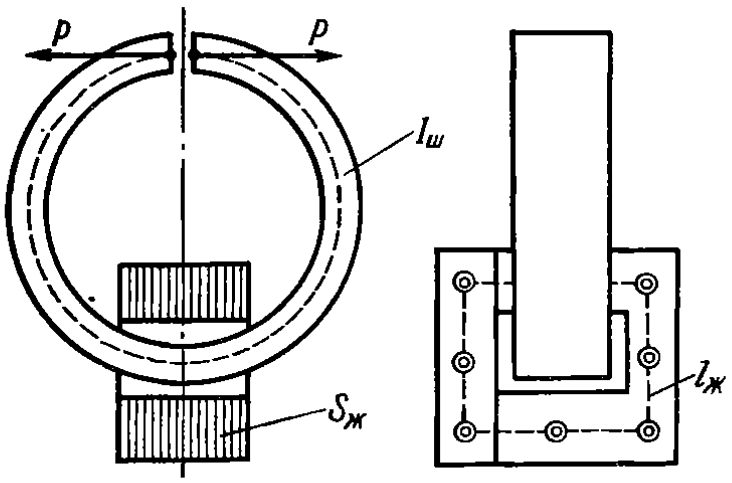


Рис. 2.7. Устранение токов шунтирования при стыковой сварке кольцевых изделий посредством разъемного железного сердечника

где $S_ж$ — в м²; $X_{др}$ — в Ом. Если напряжение на свариваемом контакте U_2, то

$$U_2 = I_ш X_{др} = I_ш 72\,000 S_ж/(I_ш 10^6),$$

откуда

$$S_ж \approx 14 U_2.$$

В этом отношении U_2 — среднее значение напряжения на свариваемом контакте в процессе его нагрева. Для стыковой сварки оплавлением это $U_{оп}$ — среднее значение напряжения в период установившегося взрывоискрового процесса.

Шунтирование тока при точечной сварке — явление значительно более сложное. Бороться с ним физически невозможно. Поэтому представляется необходимым определять масштабы шунтирования, для того чтобы иметь представление о том, насколько может уменьшиться сваривающий ток, рассчитанный на единичную точку.

Полное сопротивление ветви шунтирования (рис. 2.8) с учетом индуктивности определяется так:

$$Z_ш = \sqrt{(R_ш + r_т)^2 + X_ш^2}. \qquad (2.28)$$

По Л. Р. Нейману, активное сопротивление любого проводника из любого металла следует рассчитывать с учетом критерия $\varkappa$ [см. формулу (2.22)]

$$R_ш = R_{ош}(1 + 0{,}6\varkappa\sqrt{\varkappa}) = R_{ош} a, \qquad (2.29)$$

где $R_{ош}$ — сопротивление постоянному току при равномерном его распределении по сечению проводника.

Индуктивное сопротивление проводника, создаваемое внутренним магнитным потоком, рассчитывают по формуле

$$X_ш = R_{ош} 0{,}84\varkappa = R_{ош} b. \qquad (2.30)$$

Для точечной сварки, если только точки не ставят непосредственно одну рядом с другой, составляющая $r_т$ относительно мала по сравнению с $R_ш$. Тогда, учитывая формулы (2.29) и (2.30), находим

$$Z_ш = R_{ош}\sqrt{a^2 + b^2}. \qquad (2.31)$$

При сварке листов значительной ширины постоянный ток может растекаться между двумя точками на ширину эквивалентной полосы $h_э$ (рис. 2.9). Ее размер можно определить приближенно из следующих условий.

Согласно известной электротехнической формуле,

$$R_{ош} = \frac{2\rho}{\pi\delta} \ln\left[\frac{l}{d} + \sqrt{\left(\frac{l}{d}\right)^2 - 1}\right]. \qquad (2.32)$$

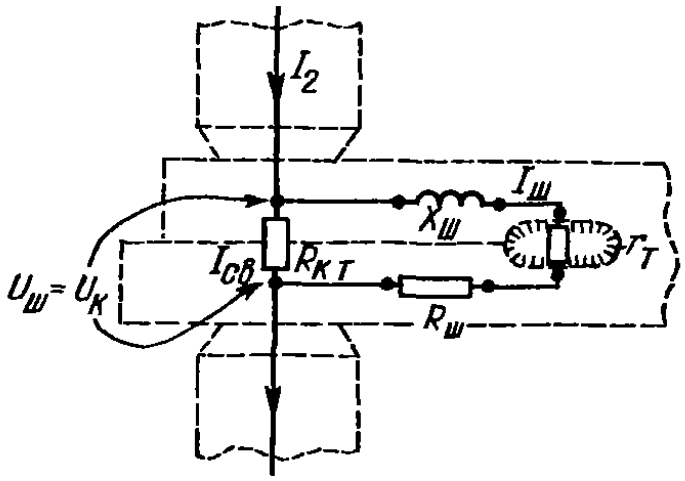


Рис. 2.8. Схема распределения сопротивлений и токов при точечной сварке с шунтированием в соседнюю точку

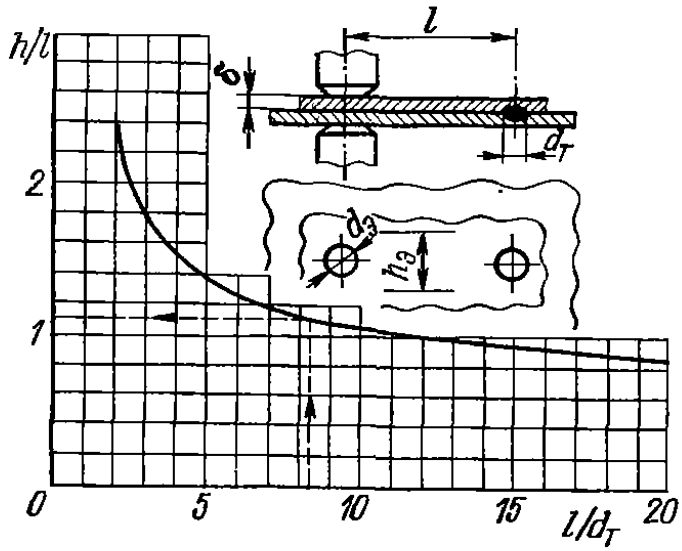


Рис. 2.9. График изменения эквивалентной ширины ветви шунтирования тока при точечной сварке

При значениях $l/d > 3$, что почти всегда имеет место при точечной сварке, можно из выражения (2.32) получить

$$R_{ош} = \frac{2\rho}{\pi\delta} \ln \frac{2l}{d}. \qquad (2.33)$$

Кроме того,

$$R_{ош} = 2\rho l/(h_э \delta),$$

откуда

$$\frac{h_э}{l} = \frac{\pi}{\ln (2l/d)}. \qquad (2.34)$$

Этот размер и определяется по графику рис. 2.9.

Если расчет токов шунтирования ведется для немагнитных металлов, у которых $\mu = 1$, то индуктивностью ветви шунтирования можно пренебречь и вести расчет только активного сопротивления по формуле (2.29). К сожалению, как показано ниже, величину критерия $\varkappa$ приходится определять весьма кропотливо. Во избежание этого вместо активного сопротивления переменному току по формуле (2.32) или (2.33) рассчитывают сопротивление постоянному току и мирятся с тем, что расчетное значение тока шунтирования получается несколько выше действительного. Наименьшее расхождение получается, естественно, при точечной сварке униполярным или выпрямленным током.

Для сварки переменным током, да еще и магнитной конструкционной стали, расчет токов шунтирования может быть выполнен по следующей методике.

Согласно (2.18) и (2.20), имея в виду возможный максимум $B = 1{,}8 \cdot 10^4$ Тл, подставляя значение μ из формулы (2.27) в (2.22) и принимая $f = 50$ Гц, получаем

$$I_ш = 0{,}04 S^2/(\mu\rho\varkappa^2). \qquad (2.35)$$

С другой стороны, учитывая выражение (2.31),

$$I_{ш} = \frac{U_{ш}}{Z_{ш}} = \frac{U_{ш}}{R_{ош}\sqrt{a^2 + b^2}}. \qquad (2.36)$$

Приравнивая формулы (2.36) и (2.37), определяем

$$\frac{2l\delta h_{э}}{25U_{ш}u} = \frac{\varkappa^2}{\sqrt{a^2 + b^2}} \approx 0{,}55\varkappa. \qquad (2.37)$$

В этом равенстве $U_{ш}$ наиболее достоверно определять так:

$$U_{ш} \approx I_{св}r_{т}, \qquad (2.38)$$

поскольку графики, приведенные на рис. 1.25, показывают возможность такого приближения.

При расчете $h_{э}$ для полос эта величина может получаться больше ширины полосы. В таких случаях, очевидно, следует брать в расчет реальный размер деталей. При большой толщине листов и размер δ может оказаться больше двойной эквивалентной глубины проникания тока. Эти дополнительные электромагнитные факторы, так же как и эффект близости, вносят в расчет неточность. Несмотря на эти обстоятельства, расчет токов шунтирования надо производить хотя бы с той целью, чтобы расчетные значения настораживали технолога и давали ему сигнал о необходимости экспериментальной проверки влияния шунтирования на размер ядра.

Для того чтобы не забывать, что токи шунтирования оказывают практически незаметное влияние на силу суммарного вторичного тока, следует привести численный пример.

Полное сопротивление вторичного контура при сварке первой, единичной, точки таково:

$$I_{2ед} = \frac{U_{2}}{\sqrt{(r_{к} + r_{т})^2 + X_{к}^2}}.$$

При сварке второй точки с шунтированием

$$I_{2ш} = \frac{U_{2}}{\sqrt{(r_{к} + R_{экв})^2 + X_{к}}}.$$

В этих равенствах $r_{т}$ принимается как среднее значение сопротивления, от которого идет ветвь шунтирования; $R_{экв}$ — эквивалентное сопротивление двух параллельных сопротивлений,

$$1/R_{экв} = 1/r_{т} + 1/R_{ш}.$$

Допустим случай даже очень сильного шунтирования, когда $R_{ш} \approx r_{т}$. Тогда эквивалентное сопротивление двух параллельных цепей

$$R_{экв} = r_{т}/2.$$

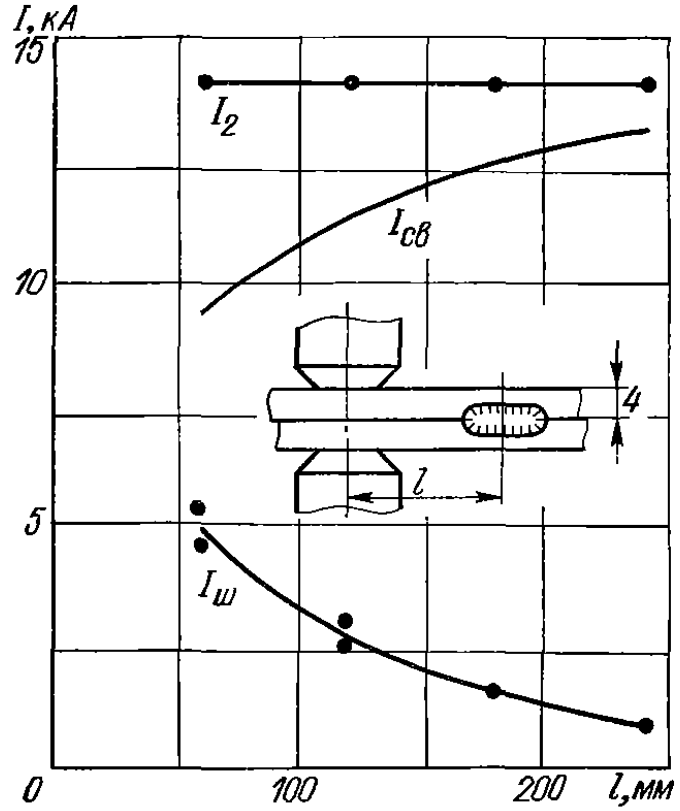


Рис. 2.10. Измеренные значения вторичного тока I_2 и тока шунтирования $I_ш$ при сварке стальных листов толщиной 4 мм (диаметр электрода $d_э$ = = 13 мм)

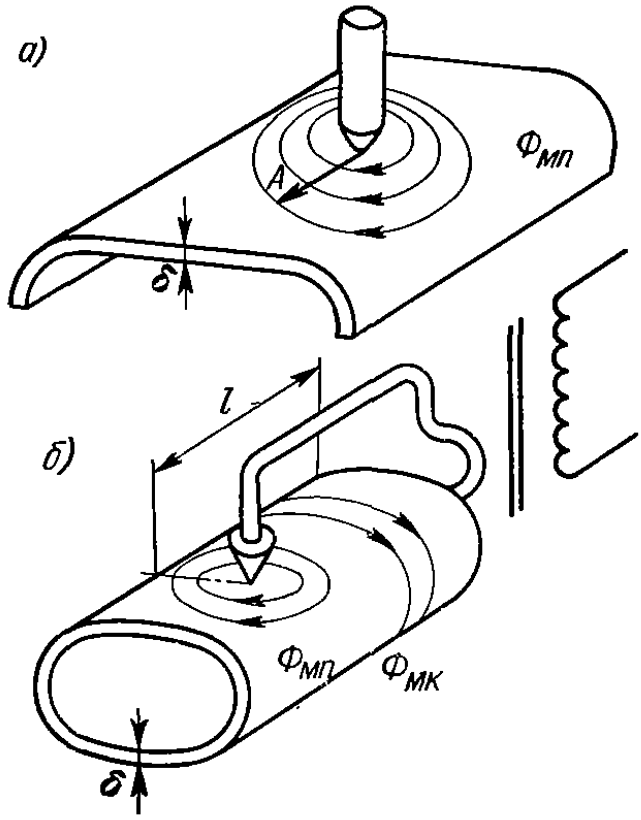


Рис. 2.11. Магнитные потоки в свариваемых деталях:
$Ф_{мп}$ — плоское поле; $Ф_{мк}$ — поле кольцевое

Если иметь в виду, что индуктивные сопротивления контуров обычно раза в 3 больше активных $r_к$, то видно, что вторичные токи $I_{2ед}$ и $I_{2ш}$ практически мало будут различаться.

Наличие токов шунтирования скажется не на суммарном вторичном токе, а на токе сварочном, поскольку

$$I_2 = I_{св} + I_ш, \tag{2.39}$$

а согласно равенствам $I_{св}r_т = I_ш R_ш$; $I_ш = I_{св}r_т/R_ш$,

$$I_{св} = I_2/(1 + r_т/R_ш). \tag{2.40}$$

Отсюда видно, что малое сопротивление ветви шунтирования может значительно снизить сварочный ток по сравнению с тем значением, которое рассчитано или установлено для единичной точки, т. е. когда $R_ш = \infty$. Снижение сварочного тока при $R_ш = (5 \div 6) r_т$ практически окажется незаметным для приборов, измеряющих вторичный ток I_2. В качестве примера такого рода на рис. 2.10 приведены измеренные значения токов вторичного и шунтирующего при сварке стальных листов толщиной 4 мм. Как видно, шунтирование при малых расстояниях между точками весьма заметно снижает сварочный ток.

В крупногабаритных изделиях из конструкционных магнитных сталей могут концентрироваться заметные магнитные по-

токи. В сварочных контурах точечных и шовных машин изделия представляют собой фактически некоторые дроссели с переменной индуктивностью. Индуктивность оказывается переменной величиной по причине искажения симметрии плоского поля $\Phi_п$, если точки ставятся от края к середине (рис. 2.11, *а*). Индуктивность, создаваемая за счет кольцевого поля, переменна в зависимости от размера l — длины свариваемой детали, вдвинутой в контур машины. Оценивать величины индуктивных сопротивлений можно на основе следующих соотношений.

Среднее значение напряженности плоского магнитного поля (рис. 2.11, *а*)

$$H_{ср} = I/(2\pi A/2),$$

где A — радиус наиболее удаленной магнитной линии. Отсюда среднее значение абсолютной магнитной проницаемости, согласно (2.35),

$$\mu_{ср} = 18\,000\pi A/I.$$

Коэффициент самоиндукции тороида, который создается одним свариваемым листом толщиной δ,

$$L_{мп} = 2\mu\delta \ln (2A/d_т).$$

Соответственно индуктивное сопротивление свариваемого листа за счет плоского поля $\Phi_п$

$$X_{мп} = 2\pi f 2\mu\delta \ln(2A/d_т)\,10^{-9} = 2\pi f \frac{2\cdot 18\,000\pi A\delta}{I} \ln(2A/d_т)\,10^{-9}.$$

Для частоты $f = 50$ Гц

$$X_{мп} = \frac{36\,000\delta A \ln (2A/d_т)}{I} 10^{-6}, \qquad (2.41)$$

где $d_т$ — диаметр точки; δ — толщина свариваемого листа.

Все геометрические размеры даны в м; I — в А; $X_{мп}$ — в Ом.

Для листов толщиной более 4 мм размер двойной эквивалентной глубины проникания магнитного потока следует проверять по формуле

$$\Delta_{экв} = \frac{5000}{\sqrt{2}} \sqrt{\rho/(\mu f)}. \qquad (2.42)$$

Если оказывается, что $2\Delta_{экв} < \delta$, то в формуле (2.41) следует принимать в расчет именно величину $2\Delta_{экв}$, поскольку только такой слой в толстых листах концентрирует в себе магнитный поток $\Phi_{мп}$.

При сварке цилиндрических изделий, когда на токоведущие штанги (рис. 2.11, *б*) надевается замкнутая магнитная масса, в ней кроме плоского поля $\Phi_{мп}$ концентрируется еще и кольцевое $\Phi_{мк}$. Этот поток создает дополнительную индуктивность, которую можно определить следующим образом.

Коэффициент самоиндукции тороида

$$L_{мк} = 2\mu l \ln (r_2/r_1).$$

Поскольку $\ln x \approx 2(x-1)/(x+1)$, то можно произвести упрощение

$$\ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{2(r_2-r_1)}{r_2+r_1} = \frac{2(r_1+\delta-r_1)}{r_1+\delta+r_1} = \frac{2\delta}{2r_1+\delta}.$$

Обычно при точечной и шовной сварке δ весьма мало по сравнению с $2r_1$, поэтому окончательно заменяем

$$\ln (r_2/r_1) \approx \delta/r_1; \quad L_{мк} = 2\mu l (\delta/r_1).$$

Отсюда при $\mu = 18\,000 \cdot 2\pi r_1/I$

$$L_{мк} = \frac{2 \cdot 18\,000 \cdot 2\pi l\delta}{I} \text{ см}.$$

Индуктивное сопротивление (Ом) за счет кольцевого поля

$$X_{мк} = 72\,000 l\delta 10^{-6}/I. \qquad (2.43)$$

Несмотря на то что формулы (2.41) и (2.43) дают приближенные результаты, расчет индуктивности производить необходимо, для того чтобы более достоверно определять электрические параметры сварочных машин.

Формулы (2.41) и (2.43) действительны для нормального переменного тока. Для машин постоянного тока или низкочастотных униполярных индуктивностями деталей следует пренебрегать. Что же касается конденсаторных машин, то при длительностях разряда, измеряемых миллисекундами, частоты получаются порядка сотен герц. Соответственно этому и индуктивные сопротивления деталей оказываются весьма чувствительными, несмотря на снижение значения магнитной проницаемости.

Главный практический вывод, который следует сделать из приведенных расчетов, сводится к следующему.

Очень часто цеховые технологи, ничего не рассчитывая, подбирают оптимальные режимы сварки на образцах малых размеров, забывая о том, что будущая крупногабаритная конструкция благодаря своей индуктивности внесет очень сильные изменения в электрические параметры сварочного контура и, следовательно, в сварочный режим, отработанный на образцах, не обладавших заметной индуктивностью.

Современные программированные режимы сварочных токов могут весьма отличаться от токов синусоидальных. Однако самым характерным и обязательным для каждой формы кривой сварочного тока являются переходные режимы: нарастание тока до максимума и его спад до нуля. Какой бы ни была кривая нарастания и спада по своей форме (а они могут быть различны), любую ее ветвь можно представить некоторой степенной функцией.

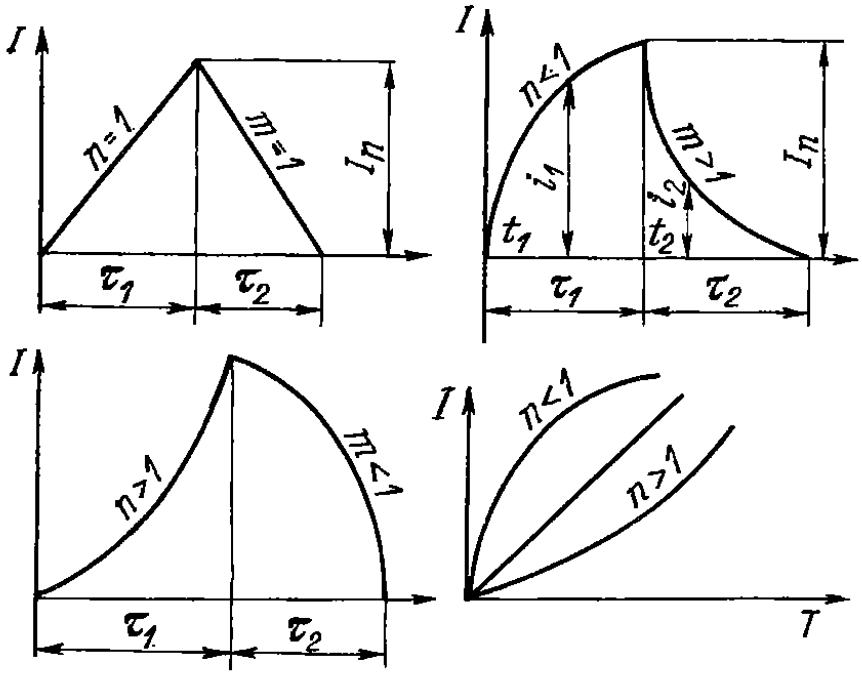


Рис. 2.12. Различные формы кривых изменения сварочного униполярного тока от времени T, а также изменения I при разных n

Так, например, если принять обозначения по рис. 2.12, то закономерно записать:

$$i_1 = I_{\text{п}}(t_1/\tau_1)^n; \quad i_2 = I_{\text{п}}(1 - t_2/\tau_2)^m. \quad (2.44); \quad (2.45)$$

В этих формулах n и m могут быть любые целые или дробные числа в зависимости от того, с какой степенью точности оказывается достаточным изобразить реальную кривую тока. В нижней части рис. 2.12 наглядно представлено, как степенные показатели n и m отображают кривизну нарастания и спада по формулам (2.44) и (2.45).

В современной практике контактной точечной сварки на конденсаторных машинах больших мощностей скорости нарастания вторичного тока иногда достигают десятков миллионов ампер в секунду. Такие скорости изменения электромагнитной энергии вызывают эффекты механических сотрясений токоведущих деталей. Ударные электромагнитные волны активизируют также поверхности свариваемых деталей через электронные конфигурации поверхностных кристаллических организаций. Как именно сказываются эти процессы на свариваемых контактах, еще никому не известно, т. е. исследований такого рода никто не производил. Мало того, никто еще не исследовал и электродинамический эффект взаимодействия токоведущих штанг вторичного контура в процессе нарастания тока. Существующие расчеты сил, действующих между двумя проводниками с током, относятся к стационарному значению коэффициентов самоиндукции и отображают картины для неизменяющихся токов во времени.

Так, в частности, известна формула

$$F = 2.10^{-7} I^2 (l/b), \quad (2.46)$$

в которой I — сила тока, протекающего встречно в проводах круглого сечения, расположенных параллельно друг другу на расстоянии между осями b на длине l.

Как известно, каждый контур тока в зависимости от его геометрии и формы проводников обладает своим коэффициентом самоиндукции, в связи с чем и электродинамические силы F для разных контуров различны.

Формула (2.5) и вытекающая из нее формула (2.7) уже показали, что во всех зонах действия электромагнитной силы она оказывает механическое давление. Однако еще более существенную роль ударное магнитное давление оказывает на металлическую поверхность, активизируя ее и вызывая экзоэлектронную эмиссию. Кроме того, магнитное давление создает и эффект тепловыделения на металлической поверхности, который может заметно сказаться при сварке цветных сплавов на мощных конденсаторных машинах.

2.3. Выделение теплоты в процессе протекания тока при стыковой сварке

Стыковая сварка как термин установилась не потому, что геометрия деталей подсказала это название. Главное в том, что тепловые и механические, а в целом энергетические картины свариваний подчиняются расчетным соотношениям с использованием только одной координаты. С этой точки зрения вполне правомерно и не различать иногда, о какой именно стыковой сварке идет речь: с нагревом джоулевой теплотой или с использованием другого вида энергии.

Рассмотрим несколько подробнее вопросы энергетики свариваемых контактов, которые были затронуты в п. 1.3. Рассмотрим еще раз формулу (1.39):

$$T_{\text{к}} = \frac{qt}{4m\sqrt{\lambda\gamma c}S\sqrt{t}},$$

где энергия qt ничем не ограничивается. Она может быть любой: тепловой, механической, электрической и т. д.

Здесь не будут рассматриваться вопросы теории и технологии сварки газопрессовой, термитной и кузнечно-горновой. Тогда, следовательно, для контактной стыковой сварки можно ограничиться таким равенством:

$$T_{\text{св}} = T_{\text{к}} + T_{\Delta} = \frac{I^2(R_{\text{к}} + R_{\text{м}})\sqrt{t_{\text{н}}}}{4m\sqrt{\lambda\gamma c}S} +$$

$$+ \frac{U_{\text{оп}} I_{\text{оп}} \sqrt{t_{\text{оп}}}}{4m\sqrt{\lambda\gamma c S}} + \frac{p_{\text{ос}} h_{\text{ос}}}{4m\sqrt{\lambda\gamma c}\sqrt{t_{\text{ос}}}} + \frac{1}{\frac{6knt_{\text{сдв}}}{\eta_0 e^2} + \frac{1}{T_{\text{пл}}}}. \qquad (2.47)$$

В п. 1.3 было показано, что современные стыковые машины совсем не проектируются и не строятся с учетом того, чтобы время $t_{\text{ос}}$ в третьем члене равенства (2.47) могло быть очень малым, т. е. с ударной осадкой. Для сварки тяжелых крупногаба-

ритных изделий таких машин и нельзя построить. Однако есть много деталей малой массы, которые своей малой инерцией не будут препятствовать ударной осадке. В таких именно случаях третий член равенства (2.47) способен обеспечивать заметную долю нагрева по сравнению с первым или вторым слагаемым. Первое слагаемое определяет нагрев теплотой Джоуля, выделяемой на сопротивлениях контакта $R_к$ и металла стержней $R_м$, переменных по величине. Второй дает нагрев путем оплавления, дуговым или искровым разрядом. В целом слагаемые равенства (первое, второе и третье) могут обеспечивать температуру в контакте даже выше точки плавления. Но, самое главное, варьировать величинами этих слагаемых можно независимо, как угодно усиливая одно, ослабляя другое, делая какое-то главным, а другие — второстепенными.

Это обстоятельство является основным для всех процессов контактной стыковой сварки. Формула (2.47) показывает, что *физическая природа процесса сваривания не знает разграничений на способы сварки; методом сопротивления, методом оплавления, ударно-стыковой и др.* Разграничения такого рода введены конструкторами контактных стыковых машин: в них ограничены пределы прикладываемых давлений и, самое главное, механизмы самих машин выбираются такими, что приложение давлений происходит инерционно. В контактные стыковые машины заложены и ограничения электрических параметров. Все эти электрические и механические ограничения приучили технологов отрабатывать предельные значения силы тока и давлений. К сожалению, эти ограничения по существу противоречат физике процесса сваривания, которое обеспечивается непрерывным рядом режимов и нагрева, и давления. Именно об этом и говорит равенство (2.47). В нем целый ряд регулируемых переменных:

1) сопротивления контакта и металла $R_к$ и $R_м$;
2) форма кривой изменения сварочного тока во времени;
3) время включения тока нагрева $t_н$;
4) мощность оплавления или разряда $U_{оп}I_{оп}$;
5) длительность этих разрядов $t_{оп}$;
6) давление осадки $p_{ос}$;
7) скорость осадки, определяемая размером осадки $h_{ос}$ и временем $t_{ос}$.

Наконец, независимо от всех предшествующих слагаемых нагрева, равенство (2.47) завершается составляющей $T_Д$, которая тоже содержит две переменных: время сдвига $t_{сдв}$, относительную деформацию ε.

Как видно, технолог мог бы в своих технологических проектах оперировать, по крайней мере, девятью переменными. Однако современные машины позволяют ему ориентироваться только на три-четыре. Разумеется, такое ограничение весьма обедняет возможную технологию стыковой сварки, и притом настолько, что равенство (2.47) в его широком понимании позволяет пред-

ложить целый ряд новых, пока не существующих процессов сварки. Здесь уместно привести некоторую аналогию.

Ручная дуговая сварка за многие годы ее существования претерпела множество качественных скачков в своем развитии. Эти скачки каждый раз определялись введением в процесс какой-то новой переменной. Такими переменными были: качественное покрытие, флюсы, газовая среда и, наконец, сжатие дугового разряда, дугового пространства. Следует подчеркнуть, что последняя переменная по природе своей совсем не металлургическая, но она и дала выдающийся скачок развития совершенно особых плазменных процессов сварки и резки.

Контактная сварка уже давно нуждается в новой переменной. Такой, судя по изложенным выше соображениям, должна быть механическая энергия во всем многообразии ее программирования. Если сегодня исходить из этих позиций, то все современные технологические схемы и литературные рекомендации выглядят не более, чем описания таких процессов сварки, которые только приспосабливаются к определенным параметрам изготавливаемых машин.

Из всех процессов контактной сварки стыковая в наибольшей степени занимала многих исследователей. Особый интерес вызвали электротепловые явления, связанные с нагревом свариваемых стержней. Наиболее известны теоретические расчеты К. К. Хренова, Н. Н. Рыкалина, А. И. Пугина, И. Я. Рабиновича, Т. Окамото. Решения электротепловых задач, особенно для стыковой сварки методом сопротивления, доведены до высокой степени совершенства и позволяют определять не только режимы нагрева, но и структурные картины сварных стыковых соединений.

Джоулева энергия, которую можно выделить в свариваемом контакте, согласно равенству (1.52), определяется так:

$$qt = I^2(R_к + R_м)t = I^2[R_к(T) + R_м(T)]t. \qquad (2.48)$$

Обращаясь к опытным данным, замечаем (см. рис. 1.22), что в процессе нагрева и сваривания полное сопротивление стыкового контакта падает приблизительно линейно от начального значения в холодном состоянии до нуля в момент сдавливания и сваривания контакта. Кривые, показанные на рис. 1.22 и 1.23, получены путем обработки осциллограмм процесса нагрева контакта. Эти кривые показывают, что при неизменном давлении полное сопротивление стыкового контакта меняется по такой зависимости:

$$R_{кс} = R_{кс0}(1 - \sqrt{t}/\sqrt{\tau}), \qquad (2.49)$$

где t — текущая координата времени; τ — длительность включения сварочного тока.

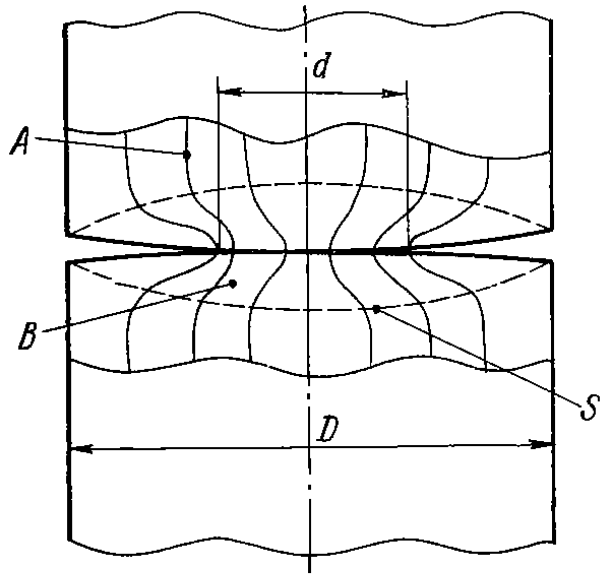


Рис. 2.13. Искривление линий электрического тока в стыковом контакте

Изменение полного сопротивления стыкового контакта от температуры в плоскости контакта вполне достоверно описывает (см. рис. 1.22 и 1.23) формула

$$R_{кс} = R_{кс0}(1 - T/T_{пл}), \quad (2.50)$$

где $R_{кс\,0}$ — полное сопротивление стыкового контакта при комнатной температуре.

Тепловыделение в зоне контакта происходит не только за счет полного контактного сопротивления $R_{кс}$, но и за счет активного сопротивления самих стержней. Разделить, однако, эти сопротивления так, чтобы их изменение в процессе сварки можно было бы рассматривать по отдельности, — задача нереальная.

Действительно, посмотрев на рис. 2.13, можно убедиться, что зона B, в пределах которой происходит искривление линий электрического тока, непостоянна: она максимальна в начальный момент и полностью исчезает в конце сварки, ведь эта зона и определяет геометрическую составляющую полного сопротивления контакта. Вместе с тем зона A тоже подвижна и тоже влияет на тепловую картину сваривания, но эта зона, отделяемая от зоны B подвижной поверхностью S, уже обусловливает активное сопротивление самих стержней.

Для рассмотрения сложной картины тепловыделения в стыковом контакте рационально считать, что действительно наблюдаемая в контакте температура $T_к$ представляет собой сумму двух составляющих: температуры $T_{кс}$, развивающейся только за счет полного сопротивления контакта; температуры $T_м$, которую создает тепловыделение за счет только активного сопротивления самого металла. При таком допущении все же следует помнить о некоторой неточности, заключающейся в следующем. Повышение удельного сопротивления металла в непосредственной близости от контакта будет происходить не только за счет нагрева металла стержня электрическим током, но и за счет теплоты, развивающейся в контакте и передающейся металлу в обе стороны от контакта. Поэтому, измеряя температуру, развивающуюся за счет активного сопротивления при нагреве сплошного стержня в губках стыковой машины, мы получим меньшее значение температуры по сравнению с тем случаем, когда будем измерять температуру $T_к$ в непосредственной близости от контакта двух свариваемых стержней того же сечения. При очень малых значениях $R_{кс}$, когда и температура $T_{кс}$ относительно мала, тем-

пература для целого стержня и температура $T_к$ для двух сваривающихся стержней будут близки. Если же температура $T_{кс}$ сравнима по величине с общей температурой $T_к$, действительно развивающейся в контакте, то составляющая $T_м$ будет получаться выше той, которую можно рассчитать для нагрева целого стержня с учетом только изменения его удельного сопротивления в зависимости от температуры.

Несмотря на невозможность экспериментального разделения составляющих температур $T_{кс}$ и $T_м$, весьма целесообразно учитывать температуры $T_{кс}$ и $T_м$ отдельно, расчетным путем, как слагаемые общей действующей температуры $T_к$. Это позволяет более правильно представлять процесс тепловыделения в контакте и слоях металла вокруг него. Влияние той или иной величины сопротивления контакта на характер изменения температуры выясняется при этом особенно отчетливо.

Температура нагрева стержня только за счет его собственного активного сопротивления, если пренебречь всеми тепловыми потерями, может быть определена из равенства

$$\frac{I^2\rho_0 x}{S}(1 + kT_м)\,dt = \gamma c S x\,dT_м, \tag{2.51}$$

где x — некоторое расстояние от контакта, в пределах которого фиксируется среднее значение температуры.

Решая это уравнение, получаем формулу

$$T_м = \frac{1}{k}\left[\exp\frac{k\rho_0}{\gamma c} i^2 t\right) - 1\Big]. \tag{2.52}$$

Температура нагрева стержня только за счет $R_{кс}$ в пределах того же расстояния от контакта x может быть определена из другого равенства

$$I^2 R_{кс0}(1 - T_{кс}/T_{пл})\,dt = 2\gamma c S x\,dT_{кс}.$$

Каково бы ни было распределение температуры от плоскости контакта по длине стержня x, согласно (1.36)

$$x = \xi 2\sqrt{at}.$$

Тогда решение для температуры $T_{кс}$ получим в виде следующей формулы

$$T_{кс} = T_{пл}\left[1 - \exp\left(-\frac{I^2 R_{кс0}\sqrt{t}}{T_{пл} 2\xi\sqrt{\lambda\gamma c S}}\right)\right]. \tag{2.53}$$

Скорости подъема температур $T_{кс}$ и $T_м$ весьма различны:

$$\dot{T}_м = \exp\left(\frac{k\rho_0}{\gamma c} i^2 t\right)\frac{\rho_0 k}{\gamma c} i^2;$$

$$\dot{T}_{кс} = \exp\left(-\frac{R_{кс0} I^2\sqrt{t}}{2\xi\sqrt{\lambda\gamma c S}}\right)\frac{R_{кс0} I^2}{2\xi\sqrt{\lambda\gamma c S 2\sqrt{t}}}.$$

Отношение этих скоростей

$$\frac{\dot{T}_{кс}}{\dot{T}_{м}} = \frac{R_{кс0}}{\rho_0 x/S}\frac{1}{2}\exp\left(\frac{k\rho_0 i^2 t}{\gamma c} - \frac{R_{кс0} I^2 \sqrt{t}}{T_{пл} 2\xi \sqrt{\lambda\gamma c S}}\right).$$

В начальный момент включения, или при импульсном режиме, т. е. при $t \to 0$

$$(\dot{T}_{кс}/\dot{T}_{м})_{t\to 0} = \frac{R_{кс0}}{2\rho_0 x/S}. \qquad (2.54)$$

Это соотношение весьма существенно для выбора способа нагрева и способа сварки. Из него видно, что регулировать интенсивность тепловыделения в плоскости контакта технолог может, главным образом, величиной начального сопротивления контакта. Здесь открываются, в первую очередь, возможности оперирования с программированием механического давления. Контактное сопротивление, как было ранее показано, зависит от конструкции контакта. Это значит, что, придавая различную форму свариваемым деталям, можно получить различное сопротивление контакта и, следовательно, разные скорости тепловыделения и, соответственно, разные картины температуры распределения.

Все это можно иллюстрировать примерами, показанными на рис. 2.14 и 2.15. Идеальное контактирование обеспечивается при подготовке контакта по схеме рис. 2.14, *а*. Плоские торцы никогда не могут дать осесимметричного тепловыделения (рис. 2.14, *б*). Несимметрия тем больше, чем больше размер *d*. Этот факт и определяет одну из причин, вследствие которой стыковая сварка методом сопротивления используется для стержней диметром не более чем 12—14 мм. При бо́льших размерах диаметра или ширины свариваемых полос и лент получается перегрев или даже пережог металла в точке *1* по сравнению с зоной *2* (рис. 2.14, *б*).

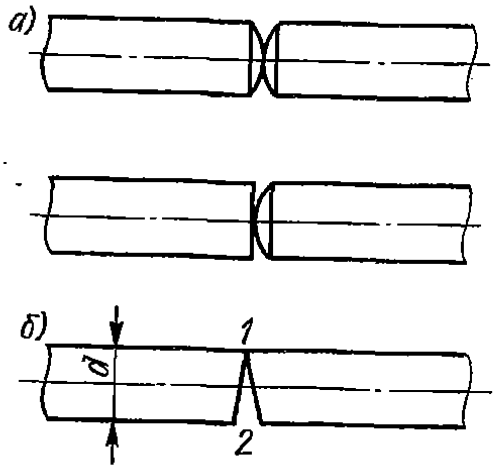


Рис. 2.14. Конструктивная подготовка деталей для стыковой сварки

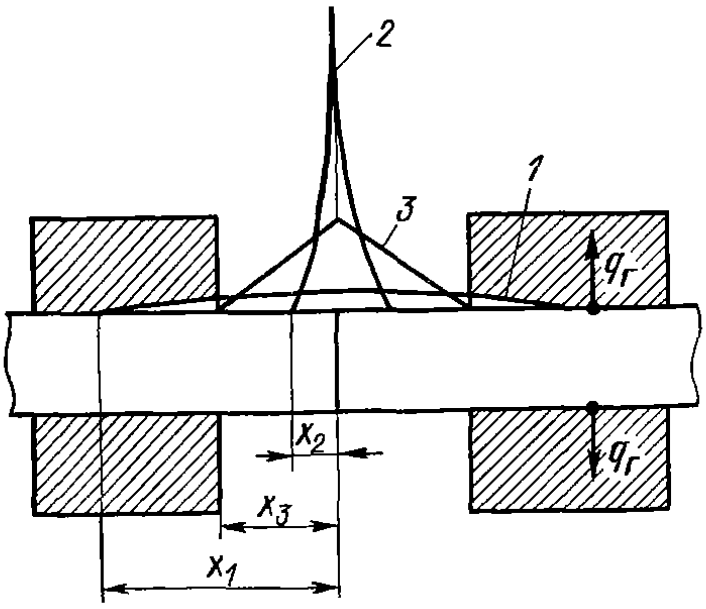


Рис. 2.15. Возможные кривые распределения температуры в деталях при стыковой сварке в зависимости от концентрации энергии в плоскости контакта

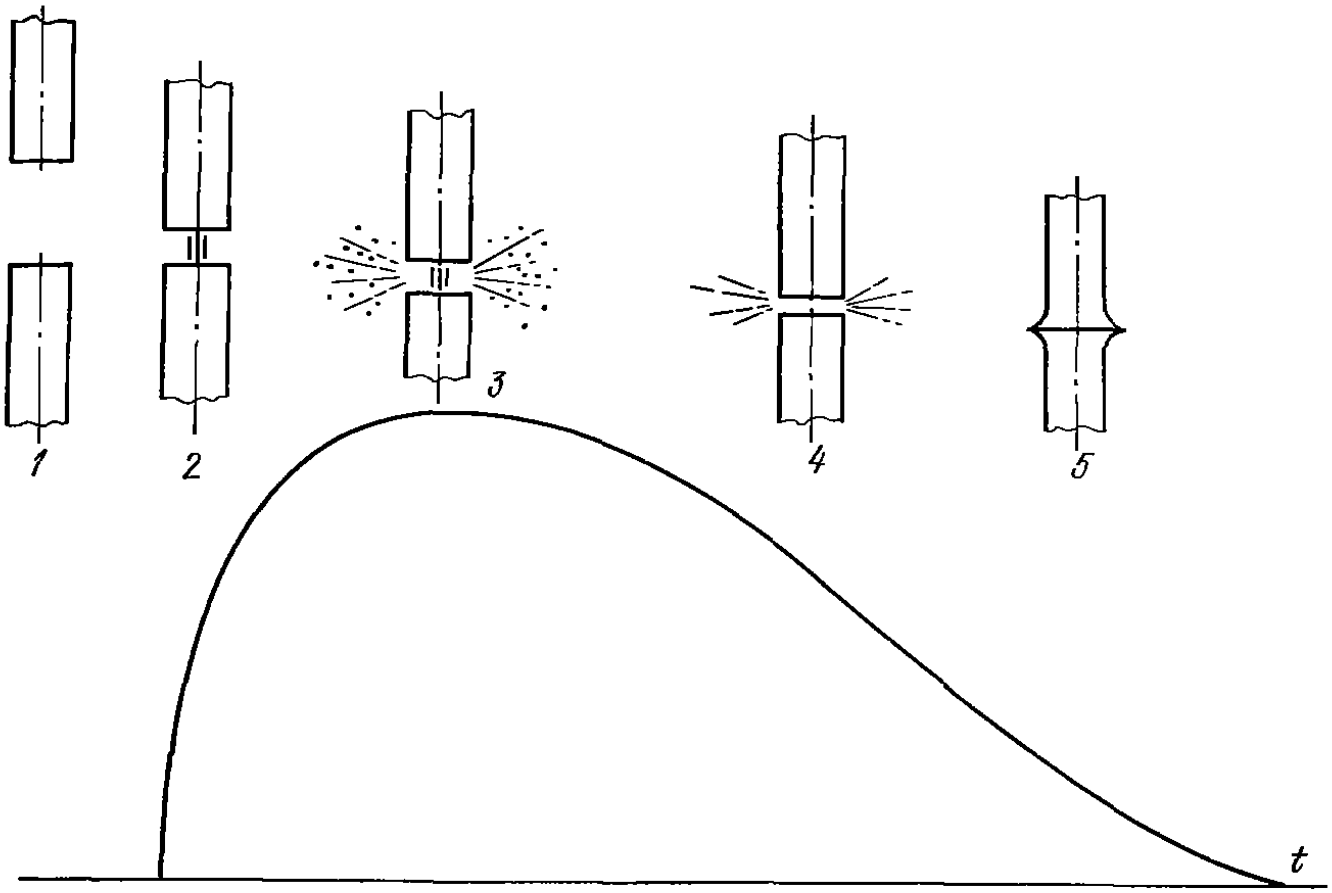


Рис. 2.16. Ударно-стыковая сварка разрядом кондеисатора. Осциллограмма сварочного тока и отдельные моменты формирования разряда

Тепловыделение в контакте и распределение температуры по свариваемым стержням, согласно формуле (2.54), определяется давлением и силой сварочного тока, т. е. вполне регулируемыми параметрами.

Кривая *1* (рис. 2.15) определяет распределение температуры при слишком большом давлении и относительно малом токе. Кривая *2* характерна для импульсного режима, например для сварки разрядом конденсатора (*3* — нагрев методом сопротивления). Охлаждающее действие зажимных губок в условиях реальной действительности несущественно. Это объясняется малым коэффициентом теплопроводности контакта деталь — губки вследствие неизбежного загрязнения губок в условиях производства.

Как было показано ранее [см. формулу (1.37)], глубина прогрева x_1, x_2 и x_3 определяется временем действия энергии в плоскости контакта. Наименьший размер x_3 может быть получен в пределах долей миллиметра. Это происходит при ударной стыковой сварке проволок разрядом конденсатора или разрядом электромагнитной энергии, запасенной в железной массе трансформатора.

Принцип ударной сварки проволок сводится к следующему. Верхний конец свариваемой проволочки (рис. 2.16, поз. *1*) вместе с зажимающей его губкой падает на нижний конец, закрепленный в столе ударной машины. Проволочки находятся под напряжением 900—2000 В. В момент времени, при котором расстояние h снижается до пробойного, возникает стриммер, т. е. тонкий проводя-

щий плазменный шнур, и начинается разряд конденсатора. Стриммер превращается в концентрированный разряд. В момент максимума тока, на участке от позиции *2* до *3*, скорость взрывоискрового выплавления кипящего металла проволочек равна скорости падения верхнего зажима. От позиции *3* до *4* интенсивность разряда падает и, наконец, в позиции *5* проволочки стыкуются ударом, выплескивающим из стыка жидкий кипящий слой. Контакт сваривается ударным давлением, плоскость свариваемого контакта представляет собой тончайший (микрометры и десятки микрометров) слой интерметаллида, если свариваются разнородные сплавы. Малая толщина интерметаллидов, или малая толщина структурно дезорганизованного однородного металла, практически не снижают прочность сварных соединений по сравнению с прочностью целого металла. Концентрация энергии в контакте такова, что позволяет приваривать проволоку к любым массивным деталям.

Резко концентрированная энергия в свариваемом контакте характерна и для основного процесса стыковой сварки, который носит название стыковой сварки методом оплавления. Это процесс физически очень сложный. В настоящее время благодаря работам академиков УССР В. К. Лебедева и С. И. Кучук-Яценко создана весьма основательная теория процесса оплавления, разработана технология многих ответственных конструкций и соединений, разработаны новые специализированные машины. Рассмотрим только основные элементы физической сущности процесса оплавления.

Сварочный цикл начинаем с того, что (рис. 2.17, *а*) к разомкнутым стержням подключаем вторичное напряжение U_{xx}, при котором начинаем сближать стержни так, чтобы они встретились в какой-то физической точке (рис. 2.17, *б*). Поскольку этот контакт единственный, на который мы замыкаем всю электромагнитную энергию трансформатора, то за тысячные доли секунды контактирующие микровыступы не только расплавятся, но расплав даже вскипит (рис. 2.17, *в*). Какие же силы в эти мгновения действуют на жидкую перемычку? Это можно рассмотреть на рис. 2.17, *г*.

При малом зазоре между стержнями силы поверхностного натяжения $P_{\text{п. н}}$ стремятся эту жидкую перемычку «размазать» на торцы стержней. Магнитное поле H, охватывающее перемычку, стремится ее перерезать. Уже этих двух сил достаточно, чтобы ликвидировать перемычку. Однако через нее, пока она цела, идет ток, перемычка вскипает и не только разрывается — она взрывается. Этот взрыв сопровождается выбросом мелких брызг металла на далекое расстояние от машины. Такой эффект создает действующая в сварочном контуре электродинамическая сила $P_{\text{эд}}$. Как известно, электромагнитно-равновесным контуром является круг. Вторичный контур трансформатора, вместе с включенными в него свариваемыми деталями, весьма далек от правильного

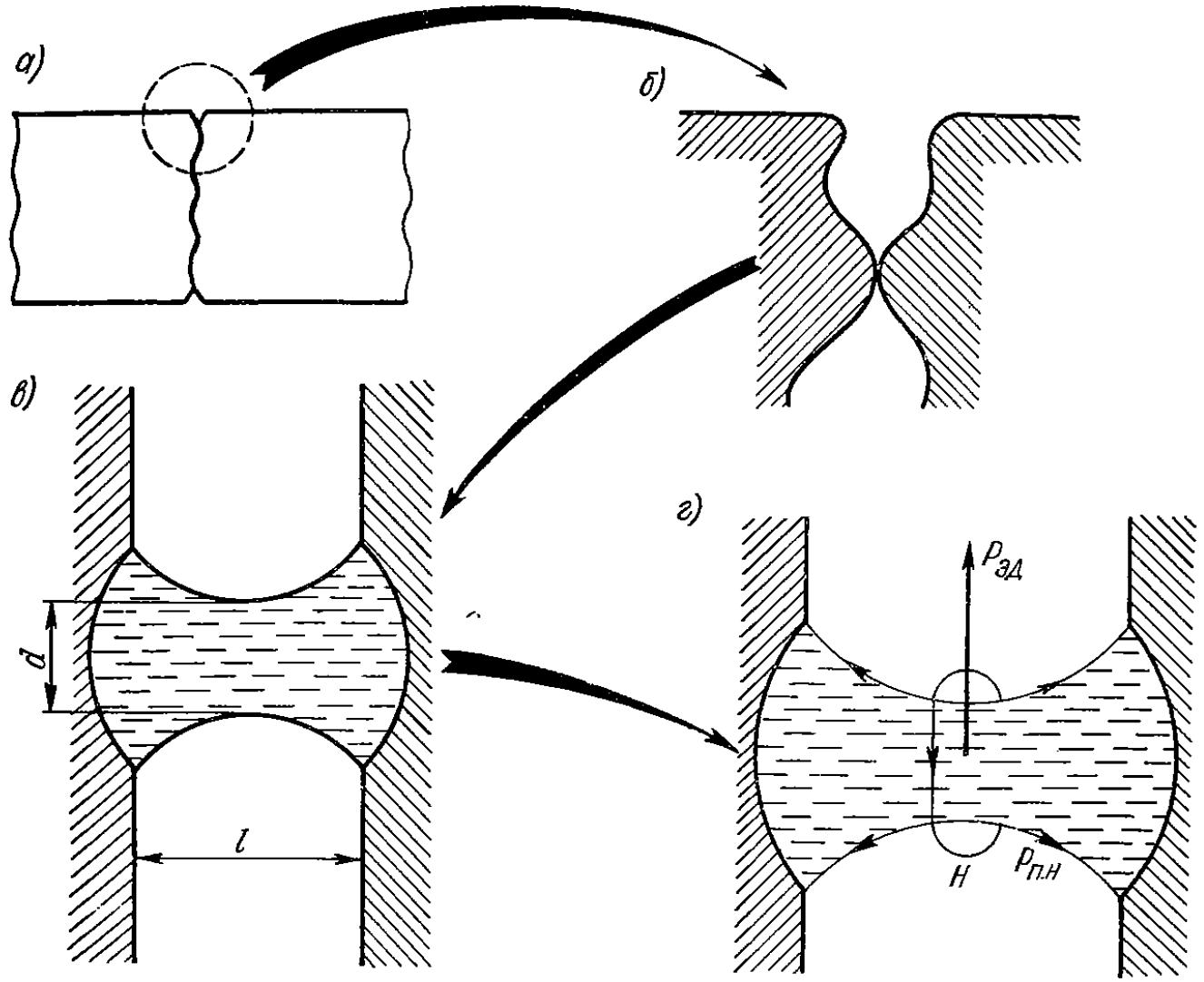


Рис. 2.17. Схема образования и последующего взрыва единичного контакта при стыковой сварке оплавлением

круга, но к нему надо обязательно стремиться. Жесткость всех шин, создающих вторичный контур, полностью препятствует формированию круглого контура. И в этом контуре только жидкая перемычка оказывается легко податливой под воздействием давлений магнитных линий сварочного контура. Она под влиянием этого давления и начинает движение во внешнее пространство. Так рвется и взрывается под влиянием всех перечисленных сил единичная контактная перемычка между двумя стержнями за время в несколько миллисекунд.

Взрыв перемычки заканчивается либо искровым разрядом между стержнями, либо кратковременным дуговым. Любой из этих разрядов оставляет след на торцевых поверхностях. Так, в частности, электрический искровой разряд производит удар, давление которого можно определить по формуле

$$p_{иск} = 3{,}3 \cdot 10^2 \sqrt[3]{E}/r, \qquad (2.55)$$

где $p_{иск}$ — ударное давление, МПа, E — энергия искрового разряда, Дж; r — радиус шарового пространства, в котором произошел искровой разряд, м.

Пример. Допустим, свариваются стержни диаметром 30 мм. Радиус шарового объема взорванной перемычки $r = 1{,}5$ мм. Энергия взрыва при токе $I_{оп} = 10\,000$ А и напряжении $U = 5{,}2$ В за время $t = 5 \cdot 10^{-3}$ с

$$E = 5{,}2 \cdot 10\,000 \cdot 5/10^3 = 260 \text{ Дж};$$

$$p_{иск} = 3{,}3 \cdot 10^2 \sqrt[3]{260}/(0{,}15 \cdot 10^{-2}) = 14\,080 \text{ МПа}.$$

Таким образом, взрыв элементарной перемычки создает такой удар по торцевой поверхности, который не может не оставить на ней особого структурного следа. Если в какое-то мгновение перед взрывом перемычку считать цилиндриком (рис. 2.17, *г*) диаметром $d = 3$ мм и длиной $l = 3$ мм, то при той же энергии $E = 260$ Дж температура металла перемычки составит

$$T = 260/(\gamma c V) = 260/(5 \cdot 0{,}02) = 2600 \text{ °C}.$$

Эта температура весьма близка к точке кипения. Сжатие перемычки и уменьшение ее диаметра до 2 мм мгновенно повысит температуру до состояния испарения. Однако электромагнитные силы пинч-эффекта и $P_{эд}$ не ждут этой температуры, а рвут перемычку и выбрасывают ее металл в виде мелких брызг до момента кипения.

До сих пор мы занимались единичной перемычкой. Однако процесс оплавления механически сводится к тому, что стержни по мере взрыва перемычек с некоторой скоростью перемещаются навстречу друг другу. Скорость перемещения подбирается такой, чтобы непрерывно создавались и взрывались не только одна перемычка за другой, но и несколько одновременно. При установившемся процессе оплавления между торцами бушует непрерывный взрывоискровой процесс от 300 до 500 перемычек в секунду. Получается сильнейший эффект сплошного фейерверка из потока мелких брызг горячего металла, который виден издалека, если зону оплавления не закрывают особыми футлярами по правилам техники безопасности.

На рис. 2.18 показано, как от первой *1*, единичной, перемычки взрывоискровой процесс развивается по торцевым поверхностям благодаря медленному непрерывному сближению торцов и за счет замыкания некоторых узких зазоров брызгами металла только что взорванных перемычек (точки *2*—*4*, рис. 2.18). Установившийся процесс оплавления — это сплошной веерообразный сноп мелких брызг раскаленного металла.

С помощью осциллографа можно проследить весь процесс сварки оплавлением (рис. 2.19). На рис. 2.19, *а* на стержни подано напряжение холостого хода $U_{хх}$. Стержни разомкнуты, никакого тока нет: $I = 0$. На рис. 2.19, *б* показан момент времени, когда процесс оплавления установился как бурный и непрерывный взрывоискровой. Напряжение на стержнях и ток фиксируются как некоторые высокочастотные кривые, наложенные на синусоидальную основу. Амплитудное значение напряжения на

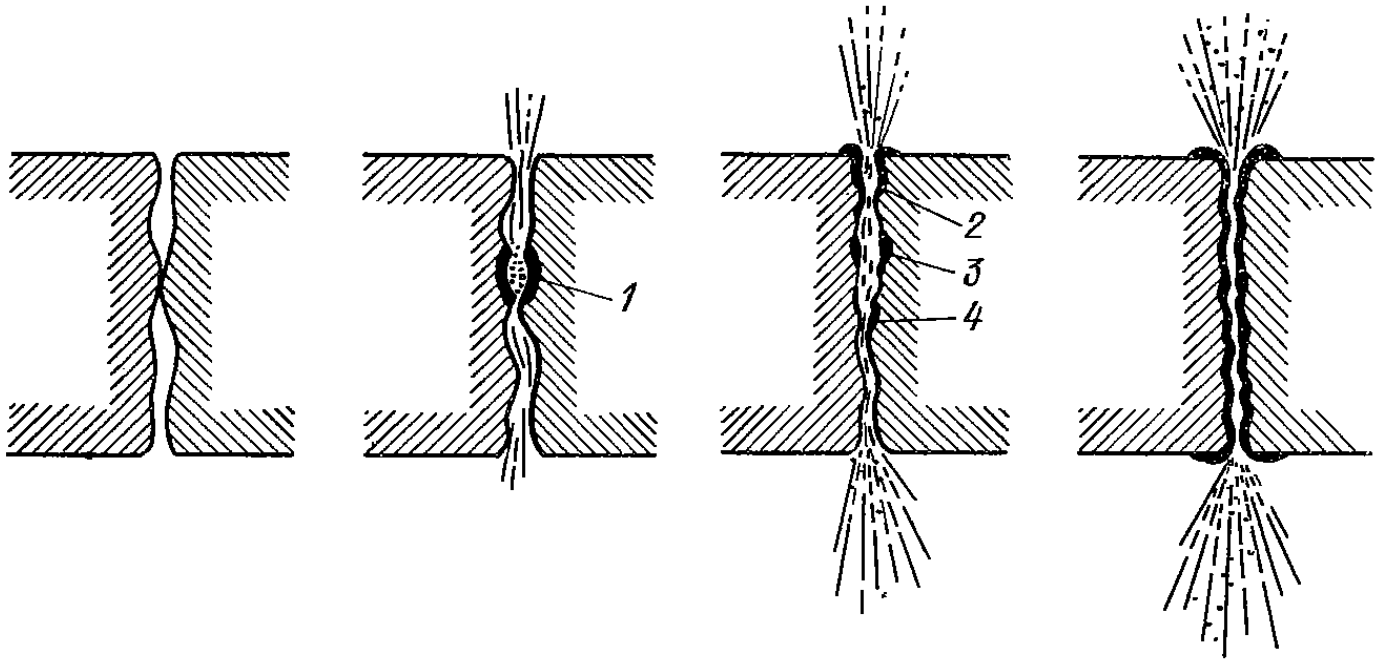


Рис. 2.18. Схема возникновения и развития процесса оплавления

стержнях $U_{оп}$ сравнительно близко к напряжению холостого хода $U_{хх}$, а амплитудный ток относительно невелик по сравнению с тем, какой получается при плотном контактировании стержней. На рис. 2.19, *в* показан именно такой момент, когда оплавление закончено и стержни сжимают для сваривания.

Как видно, электрический и электротепловой баланс процесса оплавления следует представить так:

$$q_{оп} = q_{вз} + q_{м},$$

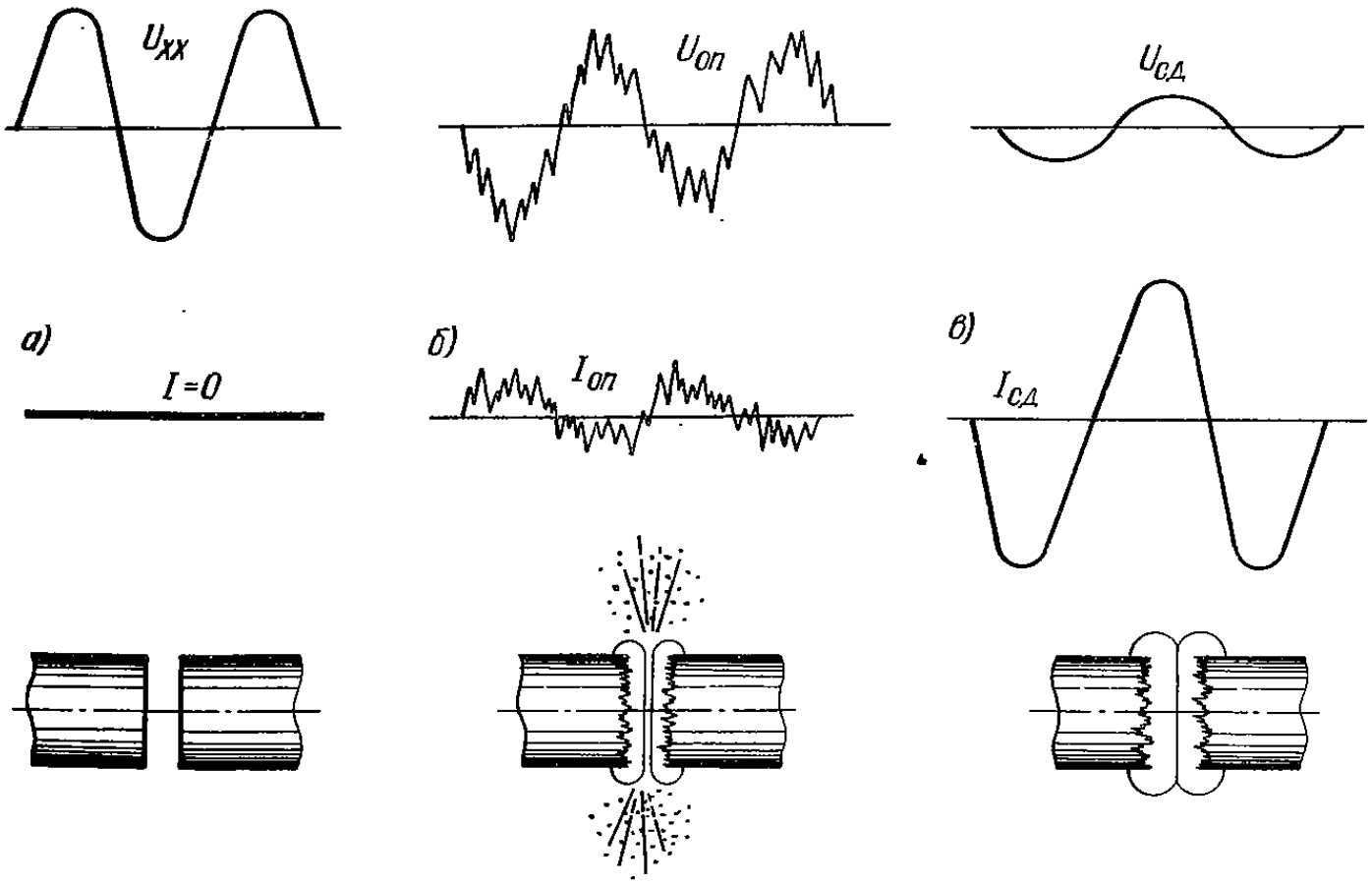


Рис. 2.19. Осциллограмма процесса стыковой сварки оплавлением

где

$$q_{оп} = U_{оп} I_{оп} t; \quad q_{вз} = \gamma c S T_{вз} h;$$

$$q_м = 2T_п \sqrt{\pi \lambda \gamma c} S \sqrt{t}.$$

В этих соотношениях $T_{вз}$ — средняя температура выбрасываемых брызг металла, вероятно близкая точке кипения; $T_п$ — температура оплавляемых торцов, тоже, вероятно, близкая к точке кипения; $q_м$ — теплота, отводимая теплопроводностью в оба оплавляемых стержня.

Имея в виду, что припуск на оплавление $h = vt$, где v — средняя скорость оплавления, получим

$$v = \frac{AU_{оп} I_{оп}}{S} - \frac{B}{\sqrt{t}}, \tag{2.56}$$

где

$$A = 1/(\gamma c T_{вз}); \quad B = 2T_п \sqrt{\lambda \gamma c}/(\gamma c T_{вз}).$$

Формула (2.56) определяет прямую зависимость скорости оплавления от удельной мощности, что полностью согласуется с весьма достоверными опытными данными Н. Я. Кочановского.

При установившемся процессе оплавления, т. е. при длительном t, формула (2.56) превращается в следующую:

$$v = AU_{оп} I_{оп}/S = AI_{оп}^2 R_{оп}/S.$$

Отсюда среднее значение электрического сопротивления взрывоискрового контакта

$$R_{оп} = U_{оп}/I_{оп} = vS/(AI_{оп}^2). \tag{2.57}$$

Формула (2.57) полностью отвечает физическому смыслу процесса и дает правильные количественные результаты. В некоторых современных учебниках и учебных пособиях приведена следующая формула для определения $R_{оп}$:

$$R_{оп} = 9500/i_{оп} \sqrt[3]{S^2} \sqrt[3]{v},$$

где $R_{оп}$ — в Ом; S — в м^2; v — в м/с; $i_{оп}$ — плотность тока, А/м^2.

Сделав некоторые замены, а именно: округлив числитель до 10^4 и считая i в А/м^2, получим (Ом)

$$R_{оп} = 1/\sqrt[3]{S^2 v} i_{оп}.$$

Умножаем обе части на $I_{оп}$:

$$I_{оп} R_{оп} = U_{оп} = \frac{i_{оп} S}{i_{оп} \sqrt[3]{S^2 v}}$$

и получаем

$$v = S/U_{оп}^3,$$

а это результат абсурдный, так как получается, что скорость оплавления максимальная при $U_{оп} \to 0$, т. е. на машине, отключенной от сети.

Операция непрерывного оплавления ведется с конечной целью: получить на торцевых поверхностях сплошной слой кипящего металла и прогреть детали на некоторую глубину, при которой металл способен пластически деформироваться под действием осадочного давления. Как уже было показано выше, современные стыковые машины не только для тяжелых свариваемых изделий, но и для легких не позволяют обеспечивать скорости осадки более 20—30 см/с. Следовательно, ни о каком ударном давлении, завершающем процесс оплавления, не может быть и речи. В связи с этим все современные технологические рекомендации по операции осадки сводятся к эмпирически установленным нормам давления (по сути дела, статического).

Если ориентироваться на такого рода нормы, то согласно формуле (1.21) можно определить

$$p = \sigma_т (1 + d/(6h)).$$

Если принимать изменение предела текучести нагретого металла по зависимости

$$\sigma_т = \sigma_{т0}(1 - T/T_{пл})^2, \qquad (2.58)$$

то для круглых стержней, а также для полос и листов давление осадки должно быть соответственно таким:

$$\left.\begin{aligned} p &= \sigma_{т0}(1 + d/(6h))(1 - T/T_{пл})^2; \\ p &= \sigma_{т0}(1 + \delta/(6h))(1 - T/T_{пл})^2, \end{aligned}\right\} \qquad (2.59)$$

где $\sigma_{т0}$ — предел текучести металла в холодном состоянии, d — диаметр свариваемых стержней; h — заданное, конечное после осадки расстояние между губками машины; δ — толщина листов.

Расчет по приведенным формулам показывает, что осадочное давление может быть весьма различным. Так, в частности, для конструкционных низколегированных сталей — в пределах 30—80 МПа, для аустенитных — 150—200 МПа.

Как видно из описания стыковой сварки методом сопротивления и оплавления, электротепловые процессы в плоскости свариваемого контакта для них физически совершенно различны. Метод сопротивления — это спокойный нагрев плотного контакта; оплавление — это бурный, взрывоискровой или взрываодуговой процесс нестабильного, неустойчивого контактирования. Для оплавления необходим некоторый минимальный порог напряжения холостого хода стыковой машины. Практически устойчивый процесс оплавления не возбуждается при напряжениях ниже 2,5—3 В. Что же касается стыковой сварки методом сопротивления, то напряжения такого порядка вполне достаточны даже для осуществления весьма быстрых нагревов стержней малого диаметра.

Достаточно привести такие примеры. Круглые стержни из стали Ст3 могут быть сварены (см. рис. 1.22) силой тока 11 500 А при времени включения тока 0,75 с. Начальное сопротивление $R_{кс0} = 200$ мкОм. Следовательно, для сварки необходимо было напряжение холостого хода всего $11\,500 \cdot 200/10^6 = 2{,}3$ В.

Если эти же стержни сваривать на мягком режиме, то при большем давлении полное начальное сопротивление контакта оказывается равным 80 мкОм. При силе тока 6400 А необходимо напряжение холостого хода $6400 \cdot 80/10^6 = 0{,}512$ В. Время сварки в этом случае было 4 с.

Что касается сварки методом оплавления, то электрическое сопротивление взрывоискрового промежутка будет значительно большим, чем сопротивление плотного контакта. Впрочем, и природа самого сопротивления промежутка [см. равенство (2.57)], совершенно другая.

В этом вопросе стоит разобраться несколько подробнее. Обратим внимание на то, что в реальной действительности приходится сваривать встык не только изделия круглого или квадратного сечения (такие сечения, кстати, называются компактными). Имеется множество и развитых сечений: это трубы, полосы, листы; для них стыковая сварка методом сопротивления в большинстве случаев затруднительна из-за невозможности создать равномерное контактирование по всему периметру. Для развитых сечений во всех случаях оказывается предпочтительным методом непрерывного оплавления.

Процесс образования и разрушения контактных перемычек жидкого металла для компактных и развитых сечений не одинаков. Различие объясняется несимметрией магнитного давления на перемычки жидкого металла при сварке разных по форме сечений. На рис. 2.20, *а* показано симметричное магнитное поле

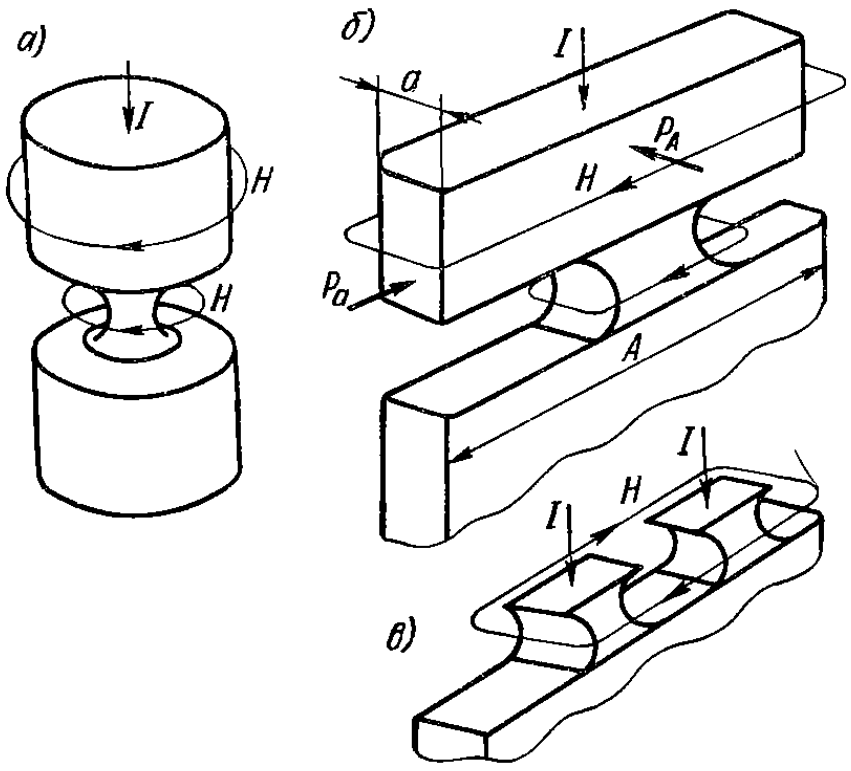


Рис. 2.20. Эффект магнитного давления на проводники различного сечения и перемычки жидкого металла при оплавлении

при сварке круглых стержней. Если же речь идет о сварке полос, то магнитное давление в этом случае ввиду кратковременности этого эффекта [см. формулу (2.42)] будет определяться так:

$$p_A = p_a A^2/a^2.$$

Это значит, что перемычка будет несколько вытянутой по ширине оплавляемой пластины (рис. 2.20, *б*). И еще есть одна особенность. Две соседние перемычки в силу общей несимметрии у их размеров по сечению и несимметрии магнитного поля (рис. 2.20, *в*) вокруг них будут стремиться к сближению. Разумеется, такое движение при оплавлении весьма быстро прервется, поскольку и перемычки будут взорваны. Этот эффект сближения перемычек жидкого металла можно, однако, визуально наблюдать, если осуществить плотное контактирование двух стальных тонких полос и нагреть контакт токами относительно небольшой силы, при которой перемычки еще не взрываются.

Пример. Представим себе процесс непрерывного оплавления круглых стальных стержней диаметром $D = 30$ мм. Исследуем момент существования только одной перемычки диаметром $d = 3$ мм. Тогда мгновенное значение электрического сопротивления этой перемычки определится по формуле (1.69), если принять удельное сопротивление металла, соответствующее точке плавления, т. е. $\rho_т = 140 \cdot 10^{-8}$ Ом·м,

$$R = \rho_т \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D}\right) = \frac{140}{10^8}\left(\frac{10^2}{0{,}3} - \frac{10^2}{3}\right) = \frac{520}{10^6} \text{ Ом}.$$

При напряжении $U_{оп} = 5{,}2$ В

$$I_{оп} = 5{,}2 \cdot 10^6/520 = 10\,000 \text{ А}.$$

Мгновенная площадь сечения жидкой перемычки

$$S = 7{,}06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Мгновенная плотность тока через перемычку

$$i_{оп} = 10\,000/0{,}0706 = 1{,}42 \cdot 10^9 \text{ А/м}^2.$$

При этой плотности тока из равенства

$$i_{оп}^2 \rho_т t = \gamma c T_{кип} \qquad (2.60)$$

можно найти приблизительное время существования перемычки. Полагаем температуру $T_{кип}$ равной точке кипения стали 2700 °С. Удельная энтальпия $\gamma_c = 5 \cdot 10^6$ Дж/(м³·°С). Тогда, подставляя в формулу (2.60) $1{,}42^2 \cdot 10^{18} \cdot 1{,}4 \cdot 10^{-6} t = 5 \cdot 10^6 \cdot 2{,}7 \cdot 10^3$, получаем $t = 5 \cdot 10^{-3}$ с.

Формула (1.69) определяет электрическое сопротивление самого металла круглых стержней. Если же речь идет о квадратных или прямоугольных сечениях, то

$$r_{гс} = \rho \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{A}\right). \qquad (2.61)$$

Формулы (1.69) и (2.61) объясняют причину трудности возбуждения процесса оплавления круглых прутков малого диаметра. Для них размеры d и D оказываются близкими друг другу, в силу чего сопротивления $r_{гс}$ очень малы. Для развитых сечений, согласно формуле (2.61), размеры a и A значительно различаются, а потому и значения $r_{гс}$ велики.

2.4. Нагрев металла в процессе точечной и рельефной сварки

Динамика электротепловых процессов при точечной сварке очень сложна. Достоверных теоретических расчетов по этой теме не создано до сих пор не только по причине их сложности. Всего вероятнее, главная причина заключается в том, что производство вполне обходится без этих расчетов, поскольку значительно легче и, самое главное, точнее установить оптимальный режим сварки непосредственно на практике и тем самым обойтись без тепловых расчетов. Однако, как уже отмечалось выше, расчетные системы, если они хорошо отображают реальную действительность, весьма необходимы для понимания физической сущности исследуемого процесса. Исходя из этого принципа, здесь и рассматриваются закономерности выделения теплоты при формировании расплавленного ядра сварной точки.

Независимо от того, с какой точностью предполагается определять взаимосвязи всех переменных, которые управляют выделением теплоты в металле в результате прохождения тока, нельзя обойтись без понятий электрических сопротивлений самого металла и металлических контактов. В п. 1.4 уже обращалось внимание на тот факт, что электрические сопротивления самих свариваемых деталей как проводников электрического тока только в редких случаях определяются их геометрическими размерами. Такой редкий случай имеет место для стыковой сварки цветных металлов, когда можно пренебречь поверхностным эффектом и сопротивление стыкуемых концов рассчитать по элементарной формуле

$$R = \rho l/S.$$

К сожалению, в некоторых даже современных литературных источниках эту элементарную формулу рекомендуют как достоверную для точечной сварки, вводя в формулу разные коэффициенты:

$$R = (\rho l/S)\, A_{д}.$$

Формулы такого рода теоретическая электротехника отвергает.

Как было показано в формуле (1.65), x — это не размер проводника, а протяженность линий тока, пронизывающих проводник. Точно также S — это не геометрический размер какого-то сечения проводника, а площадь переменного сечения потока силовых линий электрического тока. Кривизна линий электриче-

ского тока, их плотность в различных участках проводящего элемента определяются, в первую очередь, не геометрией проводника, а его физическими характеристиками в зоне прохождения тока: магнитной проницаемостью μ, удельным сопротивлением ρ. Обе эти характеристики, каждая по-своему, зависят от температуры и общих магнитных или немагнитных свойств свариваемого металла.

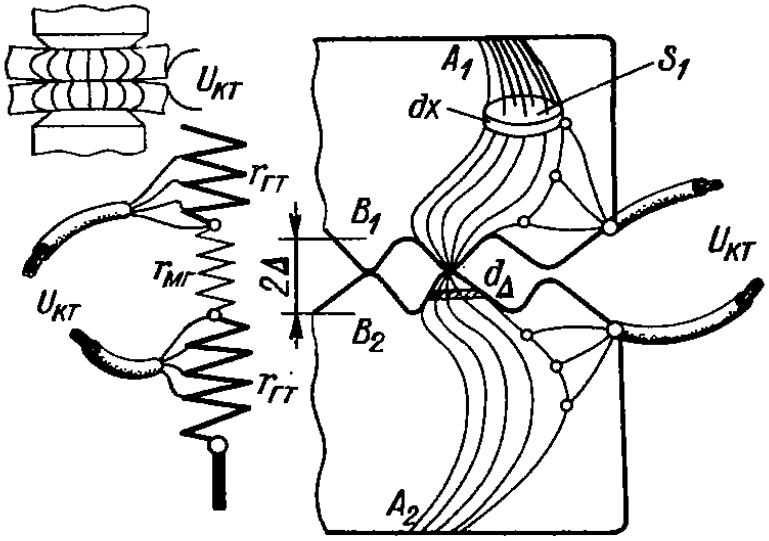


Рис. 2.21. Моделирование контакта в виде группы резисторов, на которых измеряется падение напряжения

При контактной точечной сварке очень сложна не только конфигурация проводников, но также сложны и очень нестабильны во времени температурные поля в зоне свариваемых контактов.

С точки зрения вложения энергии в зону свариваемого контакта нас интересуют два главнейших фактора: программа изменения сварочного тока во времени и активные сопротивления, которые определяют ту энергию Джоуля, которая обеспечивает необходимую активацию свариваемого контакта. Для точечной сварки эта активация должна заканчиваться плавлением ядра будущей сварной точки. В тексте, относящемся к рис. 1.25, уже предварительно было показано, что измерять мы можем только полное сопротивление контакта $R_{кт}$, равное для идеально чистых поверхностей

$$R_{кт} = r_{мг} + r_{гт}. \tag{2.62}$$

Раздельно измерить составляющие $r_{мг}$ и $r_{гт}$ нельзя. Этот факт иллюстрируется еще одной наглядной схемой измерения, приведенной на рис. 2.21. Контакт двух микропирамид моделирован резистором $r_{мг}$, а пучки линий электрического тока по металлу (участки $A_1 - B_1$ и $A_2 - B_2$) моделированы резисторами $r_{гт}$. Здесь же показано, что измерительные проводники неизбежно снимают суммарную разность потенциалов: $r_{мг}$ и $r_{гт}$.

Для двух единичных пирамид

$$r_\Delta = \int_{B_2}^{B_1} \frac{\rho_\Delta d_\Delta}{\Delta S_\Delta},$$

где S_Δ — площадь микропирамиды.

Сопротивление всех контактирующих микропирамид уже определялось по формуле (1.79). Сопротивление самого металла $r_{гт}$, в общем виде обозначенное через R, определялось по формулам (2.23) и (2.25).

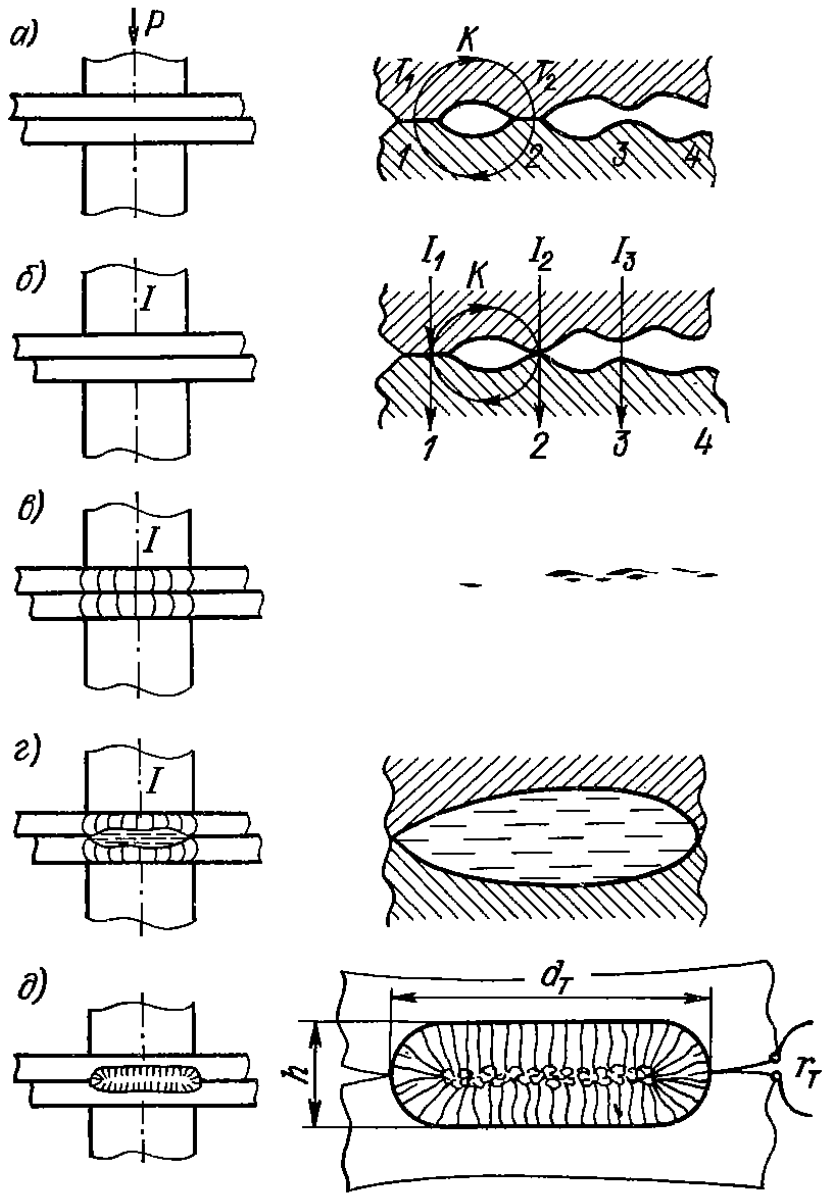


Рис. 2.22. Последовательность нагрева контакта при точечной сварке и формирования ядра сварной точки ($r_т$ — электрическое сопротивление расплавленного ядра в момент выключения тока)

Как видно, значение $r_{мг}$ и $r_{гт}$ раздельно можно определить только расчетным путем. Таким образом, все предшествующие рассуждения об электрических сопротивлениях контактов и деталей полностью оправдывают смысл первой фразы этого параграфа. Процессы выделения джоулевой теплоты в металле при формировании точечно-сварного соединения идут при изменяющихся сопротивлениях и при изменяющемся сварочном токе. Рассмотрим динамику этого процесса не только в общем виде, но и с учетом некоторых конкретных количественных характеристик (рис. 2.22, *а*—*д*). Наиболее сложная картина выделения теплоты имеет место при сварке магнитных металлов и притом не самой малой толщины.

Прежде чем будет включен сварочный ток, ударом электродов создается механический контакт двух шероховатых поверхностей деталей (рис. 2.22, *а*). Этот первый эпизод контактирования уже показывает приближенность расчета начального сопротивления контакта по формуле (1.79).

Действительно, эта формула определяет электрическое сопротивление или двух, или одной контактирующей пирамиды как сопротивление проходящему по ним сварочному току. Однако

тока в позиции рис. 2.22, *а* еще нет. Тем не менее в этом, пока еще только механическом контакте уже идут чисто электрические процессы. Удар, создав неравномерную деформацию в микроконтактах *1* и *2*, тем самым вызвал сильную экзоэлектронную эмиссию, которая в малой мере существовала и до того в этих выступах, так же как в точках *3*, *4* и других, за счет операции подготовки поверхности как механическими средствами, так и химической обработкой. Неравенство температурных вспышек в точках *1* и *2* даст неравенство и термоэлектронного эффекта. В механическом контакте на рис. 2.22, *а* уже циркулируют замкнутые электротоки K, плотности которых могут быть и непредвиденно значительными.

Если сварочный ток включился (рис. 2.22, *б*), то элементарные токи I_1, I_2 могут алгебраически суммироваться с круговыми токами и тем самым вносить свое дополнительное усложнение в расчетную формулу (1:79).

Остановимся еще некоторое время на первом мгновении включения тока и посмотрим, что должно происходить с сопротивлением контакта без учета замкнутых круговых токов.

На рис. 2.23 воспроизведена типовая кривая изменения полного сопротивления контакта $R_{кт}$ во времени, подобная той, что представлена на рис. 1.27, с той лишь разницей, что за первое мгновение после включения тока длительностью t_Δ изменение сопротивления пирамид не показано. Это первое мгновение правильнее исследовать отдельно, с помощью нижеприведенных формул и рис. 2.24, *а*.

Изменение размеров микропирамиды во времени можно представить такими закономерностями:

$$f = \Delta\left[1 - \frac{2}{3}\left(\frac{t}{t_\Delta}\right)^p\right]; \tag{2.63}$$

$$y = y_0 + (a - y_0)(t/t_\Delta)^q. \tag{2.64}$$

Температура единичных пирамид

$$T_\Delta = T_0\,(t/t_\Delta)^n.$$

Показатели степеней p, q, n могут быть различными, в зависимости от программы изменения давления электродов во времени. Удельное сопротивление микропирамид определяем по формуле

$$\rho_\Delta = \rho_0\left[(1 + kT_\Delta)\right]\left[1 + e^{\sigma_\Delta/\sigma_т}\frac{a}{\Delta}\right]. \tag{2.65}$$

Учитывая соотношения (2.63), (2.64), на рис. 2.24, *а* построены вероятные кривые изменения размеров микропирамид в пределах времени длительностью t_Δ. На основании формулы (1.76) построена кривая изменения сопротивления микропирамид, которую мы приближенно определяем как электрическое сопротивление микрошероховатого контакта $r_{мг}$ (рис. 2.24, *а*). Как

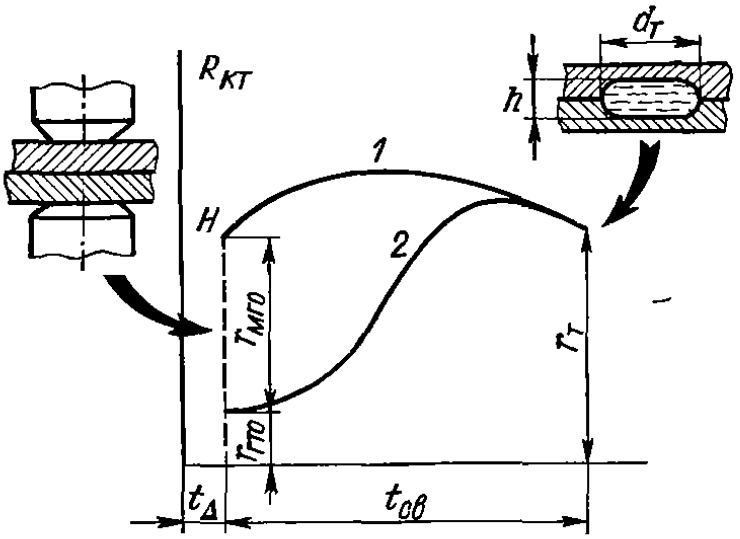


Рис. 2.23. Изменение во времени полного $R_{КТ}$ (*1*) и геометрического $r_{ГТ}$ (*2*) сопротивления свариваемого контакта при точечной сварке

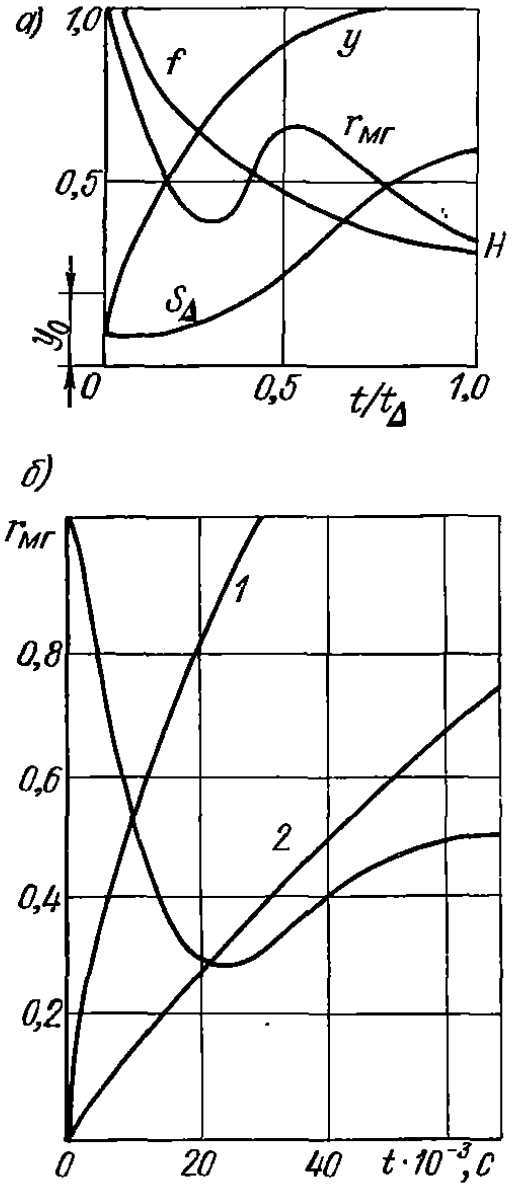


Рис. 2.24. Изменение электрического сопротивления контактирующей пирамиды в процессе ее нагрева и деформации в первые мгновения после включения тока

видно, значение $r_{МГ}$ в момент $t = t_Δ$, т. е. в точке H, должно соответствовать этому же значению на рис. 2.23.

Представим, что сварочный ток через контакт нарастает по программе *1* или *2* (рис. 2.24, *б*). Из этого же рисунка видно, что квадрат тока по программе *1*, умноженный на значение $r_{МГ}$, в момент $t = 10$ мс даст эффект тепловыделения в шесть с лишним раз больше, чем ток по программе *2* в тот же момент времени. Такая интенсификация тепловыделения обязательно создает расплавленный диск, но не обязательно одинаковой толщины. Может иметь место и резкий перегрев в какой-то зоне и, как следствие, выплеск жидкого металла из этой зоны. Если же программа тока была подобрана правильной, то вместо смятых микропирамид, осуществлявших контактирование, в плоскости свариваемого контакта создастся правильный круговой диск расплава.

Что же происходит с электрическим сопротивлением *2* (см. рис. 2.23). Для того чтобы выяснить, как изменяются все составляющие сопротивления в зоне контакта, снова сделаем количественное сравнение, используя те же данные для сварки стальных листов 4 + 4 мм, которые были приведены в п. 1.3. Удельное сопротивление холодного металла $\rho_0 = 20$ мкОм·м; расплавленного

$\rho_т = 140$ мкОм·м. При $a/\Delta = 25$, $\sigma/\sigma_т = 14\,000/25\,000$ $\rho_\Delta = 895$ мкОм·м. При $f = 35{,}35$ мкм; $X = 14\,000/(85\,000 \cdot 2 \cdot 1) = 0{,}082$

$$r_{мг\,0} = \frac{(1 \div 2)\,\rho\,\Delta f}{A_c \sqrt{1 - e^{-X}}} = \frac{(1 \div 2)\,895 \cdot 35{,}35}{0{,}57 \cdot 0{,}29 \cdot 104} = (20 \div 40)\ \text{мкОм}.$$

Это сопротивление холодного контакта группы микропирамид. Но вот произошло их плавление и образовался расплавленный диск. Удельное сопротивление металла здесь стало $\rho_т = 140$ мкОм·м, а сопротивление самого диска

$$r_{диск} = \frac{2\,\Delta\rho_т}{3A_c} = \frac{2 \cdot 60 \cdot 140}{3 \cdot 0{,}57 \cdot 10^4} = 1\ \text{мкОм}$$

оказывается весьма малым. Вместе с тем, кривая показывает в момент t_Δ сопротивление в десятки раз большее. Вот это и есть результат неотделимого от плоскости диска искривления линий электрического тока, пронизывающих расплавленный диск.

Если бы речь могла идти о статическом электрическом поле вокруг расплавленного диска, т. е. если не учитывать магнитного сжатия линий электрического тока, то сопротивление его прохождению оказывала бы составляющая

$$r_{гт0} = \rho/d. \qquad (2.66)$$

Формула эта, как и многие другие, известна из теории заземлений, где допускают возможным рассчитывать сопротивления по уравнению Лапласа, а не Максвелла, т. е. не учитывать эффект сжатия линий тока магнитным потоком. В формуле (2.66) ρ — удельное сопротивление расплава; d — диаметр диска.

Формула (2.66) имеет в виду, что две полубесконечные массы металла контактируют друг с другом только через расплавленный диск. Таким образом, линии тока, проходя из одной половины в другую и пронизывая диск, искривляются, что и фиксируется как добавочное к объемному электрическое сопротивление не только расчетом, но и измерением. Полагая, что в первое мгновение расплавленный диск окружен холодным металлом и его удельное сопротивление соответствует именно такому значению температуры, по формуле (2.66) находим

$$r_{гт\,0} = 20/1{,}2 = 17\ \text{мкОм}.$$

Этот результат следует считать для случая магнитного металла, вероятно, заниженным. Магнитный поток сожмет силовые линии тока и они примут вид скорее такой, как схематически показано по сечению нижнего листа на рис. 1.25, чем такой, как в верхнем листе того же рисунка.

Определим более достоверную форму области протекания тока, используя формулы (2.16), (2.17), (2.23) и (2.25).

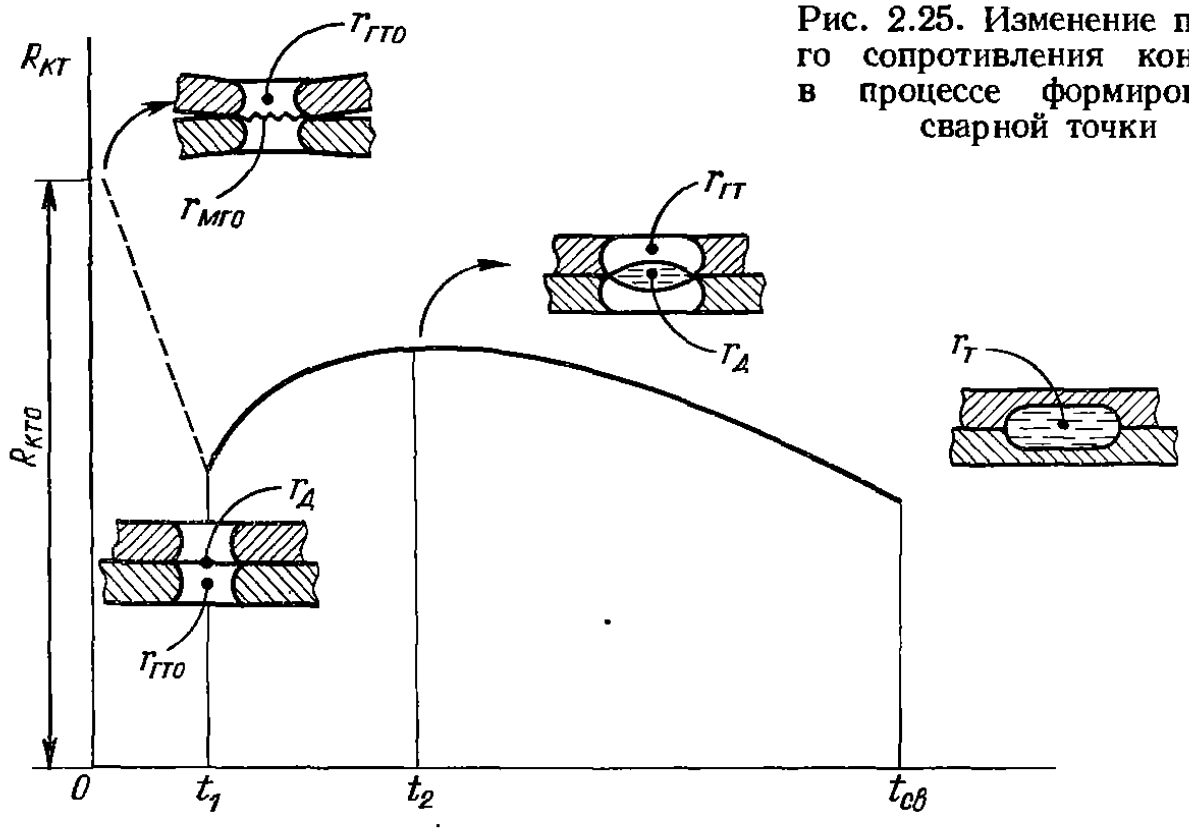


Рис. 2.25. Изменение полного сопротивления контакта в процессе формирования сварной точки

Примем силу сварочного тока $I = 10\,000$ А. При $d_0 = 0{,}85$ см $H = 3746$ А/см. По кривой намагничивания (см. рис. 2.2) находим $\mu = 5$. Тогда по формуле (2.16)

$$\delta_{экв} = 5000\sqrt{20 \cdot 10^6/(5 \cdot 50)} = 1{,}44 \text{ см};$$

$$b = \frac{1{,}44}{0{,}5 + \ln(4/0{,}85)} = 0{,}7 \text{ см};$$

$$r_{гто} = 2\frac{4\rho\delta}{\pi b d_0} = \frac{2 \cdot 4 \cdot 20 \cdot 0{,}4}{\pi \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}85} = 34 \text{ мкОм}.$$

Расчет показал, что в данном случае размер b меньше d_0, и, следовательно, линии тока в металле сжаты, как это показано в нижнем листе рис. 1.25.

Все эти численные результаты не следует считать полностью достоверными. Расчеты проделаны для того, чтобы показать, какого уровня могут быть отдельные составляющие электрических сопротивлений в зоне свариваемого контакта и в нем самом. Расчеты показывают, в том числе, совершенную нестабильность начального сопротивления микро- и макрогеометрии линий протекания электрического тока, т. е. нестабильность полного сопротивления свариваемого контакта. Как видно, эту нестабильность нельзя устранить какими-либо регулирующими устройствами, нельзя и ориентироваться на нее при расчетах.

Расчетные примеры, показанные выше, можно подытожить посредством наглядного графика, приведенного на рис. 2.25. Здесь показана временная зависимость полного сопротивления контакта и на ней отмечены отдельные характерные эпизоды изменяющихся сопротивлений, поясняемые табл. 2.1. Наиболь-

Таблица 2.1. **Изменение сопротивления сварной точки во времени**

Момент времени по рис. 2.25	Что определяет измеряемое или рассчитываемое значение сопротивления	Расчетные формулы, приближенно определяющие это значение
$t = 0$	Микрогеометрия (шероховатость) контакта	$r_{\text{мго}} = \dfrac{(1 \div 2)\,\rho_{\Delta}\,\Delta \cdot}{3A_{\text{с}}\sqrt{1 - e^{-X}}}$
	Геометрия линий электрического тока вокруг холодного контакта	$r_{\text{гто}} = \dfrac{4\rho\delta}{\pi b_0 d_0}$
$t = t_1$	Горячий диск из смятых и расплавленных шероховатостей	$r_{\text{д}} = \dfrac{4\rho_{\text{т}} 2\,\Delta}{\pi d_{\text{д}}^2}$
	Геометрия линий тока у него	$r_{\text{гто}} = 2\dfrac{4\rho_{\text{т}}\delta}{\pi b_0 d_{\text{д}}}$
$t = t_2$	Превращение диска в расплавленное ядро	$r_{\text{д}} = \dfrac{4\rho_{\text{т}} h}{\pi d_{\text{т}}^2}$
	Геометрия линий тока в горячем металле	$r_{\text{гт}} = 2\dfrac{4\rho_{\text{т}}(2\delta - h)}{\pi b\, d_{\text{т}}}$
$t = t_{\text{св}}$	Сопротивление готового расплавленного ядра сварной точки	$r_{\text{т}} = \dfrac{4\rho_{\text{т}} h}{\pi d_{\text{т}}^2}$
	Геометрия линий тока в горячем металле у расплавленного ядра	$r_{\text{гт}} = 2\dfrac{4\rho_{\text{т}}(2\delta - h)}{\pi b\, d_{\text{т}}}$

шая неопределенность относится к начальному интервалу времени: от $t = 0$ до $t = t_1$.

Наибольшая стабильность характерна для момента выключения тока, т. е. для готового, расплавленного ядра сварной точки с заданными его размерами $d_{\text{т}}$ и h. В таком случае для сварки идеально чистого металла, когда роль тонких, оптически прозрачных оксидных пленок несущественна, для формулы (1.39) можно написать

$$qt = 4I^2\rho_{\text{т}} h/(\pi d_{\text{т}}^2), \tag{2.67}$$

соответственно этому температура в плоскости контакта

$$T_{\text{к}} = \frac{I^2\rho_{\text{т}} h\sqrt{t}}{m\sqrt{\lambda\gamma c}\,\pi d_{\text{т}}\delta\pi d_{\text{т}}^2}, \tag{2.68}$$

где принято $S = \pi d_{\text{т}}\delta$.

Формула (2.68) имеет вспомогательный характер и только показывает взаимосвязь переменных процесса выделения теплоты в приближении не изменяющегося за время сварки действующего значения сварочного тока.

Картину выделения теплоты в контакте для импульсных режимов сварки металлических поверхностей, покрытых оксидной пленкой, следует рассмотреть отдельно. Задача эта очень сложная, и ее решение под силу только ЭВМ. Что же касается производственников-технологов, то им необходимы такие расчетные соотношения, которые правильно ориентируют понимание взаимосвязей всех переменных, участвующих в процессе. Исходя из этих условий, построим расчетную схему на целом ряде допущений и упрощений.

Примем допущение, что при импульсных режимах точечной сварки все энерговыделение в зоне свариваемого контакта идет на плавление ядра цилиндрической формы диаметром $d_т$ и высотой h. Форму кривых сварочных токов будем учитывать по формулам (2.44) и (2.45). Полное сопротивление свариваемого контакта с учетом оксидной пленки на нем определим суммой

$$R_{кт} = r_{мг} + r_{гт} + r_{пл}, \tag{2.69}$$

тогда тепловой баланс запишется равенством

$$(i_1^2\,dt_1 + i_2^2\,dt_2)(r_{мг} + r_{гт} + r_{пл}) = \gamma c S_т h d\theta. \tag{2.70}$$

Первый сомножитель развернем по формулам (2.44) и (2.45). Вторым сомножителем займемся отдельно — в нем все слагаемые в процессе сварки переменны. Учтем только те характеристики, которые меняются в наибольшей степени. Для слагаемого $r_{гт}$ это будет удельное сопротивление металла вокруг контакта. Вместо общепринятого его значения $\rho_т = \rho_0(1 + \alpha T)$ примем более краткую зависимость удельного сопротивления от абсолютной температуры θ. Тогда для многих металлов можно записать зависимость

$$\rho = \rho_т \theta / \theta_{пл}, \tag{2.71}$$

где $\rho_т$ — удельное сопротивление в момент плавления.

Учитывая (2.71), примем размеры ядра неизменяющимися, и для этого условия геометрическая составляющая сопротивления контакта обозначится так:

$$r_{гт} = \frac{\rho h}{S_т} = \frac{\rho_т h}{S_т} \frac{\theta}{\theta_{пл}}. \tag{2.72}$$

Электрические сопротивления микропирамид шероховатости по формулам (1.79), (1.80) в расчет вводить невозможно, иначе решение уравнения (2.70) окажется доступным только ЭВМ. Мы же ставим задачу получить возможно бóльшую наглядность взаимозависимостей переменных параметров. Приведенный выше численный пример показал, что $r_{мг0}$ от начального значения, весьма

значительного, уже при малых значениях критерия X переходит в новое качество — в расплавленный диск. Примем изменение $r_{мг}$ по упрощенной зависимости

$$r_{мг} = \frac{\rho_\Delta \Delta}{S_т}(1 - X). \qquad (2.73)$$

Здесь критерий X, по аналогии с критерием Z [см. формулу (1.7)], запишем в таком виде:

$$X = \beta\sigma\theta/\sigma_т\theta_{пл}. \qquad (2.74)$$

Коэффициент β определяет характер обработки контактирующих поверхностей металла (см. табл. 5 приложения):

$$\beta = \theta_{пл}/[\theta_{хол}(1 \div 2)\, b].$$

Значительно сложнее дело обстоит с составляющей $r_{пл}$ электрического сопротивления оксидной пленки. Для условий контактной точечной сварки эта величина практически является неопределенной переменной. Существующие литературные источники дают некоторые характеристики оксидов, но, к сожалению, измеренные в статическом состоянии и при определенной технологии изготовления оксида. Ничего подобного при точечной сварке нет. Электрические характеристики пленок на свариваемом металле неопределенны и зависят от структуры размеров и времени существования пленок с момента зачистки. Этот последний фактор определяет интенсивность экзоэлектронной эмиссии и, следовательно, косвенно влияет на удельное сопротивление пленки. Для оксидных пленок в условиях точечной сварки большинства металлов (кроме алюминия и его сплавов) можно уверенно считать только одну зависимость достоверной — это уменьшение удельного сопротивления с увеличением температуры. Мало того, можно считать, что при плавлении металла оксидные пленки растворяются в расплаве, и тогда их сопротивление вообще можно не учитывать. Исходя из такого рода соображений, примем

$$r_{пл} = \frac{\xi\psi}{S_т}\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{пл}}\right) = \frac{\xi\psi}{S_т}(1 - T), \qquad (2.75)$$

где ξ — удельное сопротивление оксидной пленки; ψ — ее толщина.

Подставляя теперь в равенство (2.70) все его отдельные слагаемые и сомножители в развернутом виде, получим довольно громоздкое уравнение:

$$I_п^2\left[\left(\frac{t_1}{\tau_1}\right)^{2n} dt_1 + \left(1 - \frac{t_2}{\tau_2}\right)^{2m} dt_2\right]\left[\frac{\rho_\Delta \Delta\,(1 \div 2)}{3S_т}\left(1 - \beta\frac{\sigma}{\sigma_т}T\right) + \right.$$

$$\left. + \frac{\rho_т h}{S_т}T + \frac{\xi\psi}{S_т}(1 - T)\right] = \gamma c S_т h \theta_{пл}\, dT.$$

Не менее громоздким получается и решение этого уравнения даже с использованием упрощений

$$\theta = \frac{\theta_{пл}}{\dfrac{\rho_т h - \dfrac{\beta\rho_\Delta \Delta\sigma}{\sigma_т} - \xi\psi}{\rho_\Delta \Delta + \xi\psi}} \left\{\exp\left[\frac{i_п^2}{\gamma c h \theta_{пл}}\left(\rho_т h - \frac{\beta\rho_\Delta \Delta\sigma}{\sigma_т} - \xi\psi\right) F(t)\right] - 1\right\}. \quad (2.76)$$

В этой формуле роль каждой переменной процесса просматривается с трудом, поэтому из нее будем устанавливать некоторые конкретные взаимосвязи, способные подсказать методы технологического регулирования процесса сварки. Прежде всего раскроем значение временно́й функции $F(t)$. Для принятых степенных функций (2.44) и (2.45)

$$F(t) = \frac{t_1^{2n+1}}{(2n+1)\tau^{2n}} + \tau\left[\frac{\left(1 - \frac{t_2}{\tau_2}\right)^{2m+1} + 1}{2m+1}\right].$$

При $t_1 = \tau_1$ и $t_2 = \tau_2$

$$F(t) = \frac{\tau_1}{2n+1} + \frac{\tau_2}{2m+1}. \quad (2.77)$$

При $\tau_1 = \tau_2$ и $m = n$, т. е. при симметричной кривой тока, поскольку $\tau_1 + \tau_2 = \tau$,

$$F(t) = \frac{2\tau_1}{2n+1} = \frac{\tau}{2n+1}. \quad (2.78)$$

В зависимости от кривизны эпюры нарастающего тока $F(t)$ таково:

n	4	2	1	1/2	1/4	1/10
$F(t)$	0,11τ	0,2τ	0,33τ	0,5τ	0,66τ	0,83τ

Определим из (2.76) скорость нарастания температуры в контакте для условия (2.78), т. е. при симметричном импульсе тока:

$$\left(\frac{\partial\theta}{\partial t}\right)_{t\to 0} = \frac{i^2\rho_т}{\gamma c}\left(\frac{\rho_\Delta \Delta}{\rho_т h} + \frac{\xi\psi}{\rho_т h}\right)\frac{2}{2n+1} = \frac{i^2\rho_т}{\gamma c}\left(\frac{r_{мг0} + r_{пл0}}{r_т}\right)\frac{2}{2n+1}. \quad (2.79)$$

Вот эта формула для технолога представляет непосредственный практический интерес. Она показывает, что для любого размера ядра скорость нарастания его температуры сильнейшим образом зависит от начального сопротивления шероховатостей и оксидных пленок на них, т. е. от величин $r_{мг0}$ и $r_{пл0}$. Поскольку нельзя эти переменные уменьшить, то все решается формой кривой тока, т. е. числом n (см. рис. 2.12). Как видно, более тонкое регулирование температуры в плоскости контакта достигается

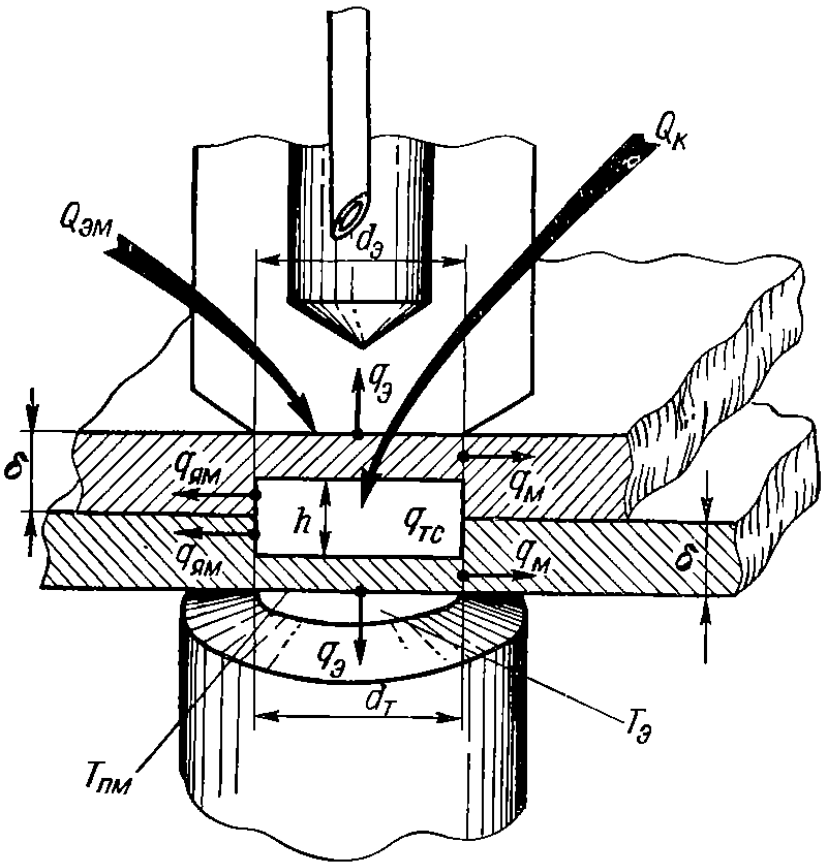


Рис. 2.26. Схема тепловых потоков при точечной сварке

именно путем изменения числа n, а не плотности сварочного тока. Как уже было показано, начальное сопротивление холодного контакта, определяемое в том числе величиной $r_{мг}$, зависит от критерия X [см. формулы (1.13) и (1.14)]. Стоит заметить, что коэффициент b, характеризующий обработку контактирующих поверхностей (см. табл. 5 приложения), может меняться от 1 до 8 при самых обычных способах подготовки металла под сварку. Что же касается изменения отношения действующего давления к пределу текучести $p/\sigma_т$, то это число в реальных условиях может быть изменено только в пределах 0,2—0,5. Следовательно, для идеально чистых металлических поверхностей (оптически прозрачная оксидная пленка) характер обработки этой поверхности сказывается на скорости тепловыделения более заметно, чем изменение действующего начального давления.

Рассмотрим теперь общую тепловую картину не только в зоне свариваемого контакта, но и целиком в свариваемых деталях. Согласно обозначениям на рис. 2.26, можно составить баланс энергии в таком виде.

К концу процесса, когда расплавлено цилиндрическое ядро диаметром $d_т$ и высотой h, на эту операцию затрачена энергия

$$Q_к = 4I^2\rho_т ht/(\pi d_т^2). \qquad (2.80)$$

Эта энергия расходуется на плавление металла ядра и тепловые потери. Их можно определить: энтальпия

$$q_{тс} = \gamma c \frac{\pi d_т^2}{4} h T_{пл}; \qquad (2.81)$$

тепловые потери в массу свариваемых деталей

$$q_м = 4mT_{пл}\sqrt{\lambda\gamma c}\,S\sqrt{t}.$$

Полагая $S = \pi d_т 2\delta$, перепишем

$$q_м = 8m\pi T_{пл}\sqrt{\lambda\gamma c}\,d_т\delta\sqrt{t}. \qquad (2.82)$$

Рассмотрим отношение энергий (2.80) к (2.82)

$$\frac{Q_к}{q_м} = \frac{4I^2\rho_т ht}{\pi d_т^2 8\pi m T_{пл}\sqrt{\lambda\gamma c}\,d_т\delta\sqrt{t}} = \frac{I^2\rho_т h}{8m\pi^2 d_т^2\lambda T_{пл}}\,\frac{\lambda\sqrt{t}}{\sqrt{\lambda\gamma c}\,d_т}.$$

Из этого отношения можно получить критерий технологического подобия, если учесть несомненную пропорциональность $P \equiv \sigma_т d_т^3$, в которой P — сила сжатия электродов. Тогда:

$$\frac{Q_к}{q_м} = \mathrm{Ki}\sqrt{\mathrm{Fo}} = \mathrm{K}; \qquad (2.83)$$

$$\mathrm{K} = \frac{I^2\rho_т h\sqrt{t}\,\sigma_т}{d_т T_{пл}\sqrt{\lambda\gamma c}\,\delta P}. \qquad (2.84)$$

Из рис. 2.26 видно, что при точечной сварке имеются еще два очага тепловыделения, это контакты электродов с деталями $Q_{эм}$. Очаги эти весьма своеобразны. Прежде всего энергия $Q_{эм}$ регулируема. Интенсивность тепловыделения в этих несваривающихся контактах зависит от формы и размера электродов, металла электродов, состояния поверхности. Эти же факторы определяют и отвод теплоты в массу охлаждаемого электрода $q_э$.

Температура поверхности металла под электродом $T_{пм}$ всегда больше температуры поверхности электрода $T_э$. Разность $T_{пм} - T_э$ может доходить до 200—300°, если наконечники электрода недостаточно часто подвергают зачистке или же поверхность свариваемого металла покрыта заметным слоем оксидов.

Если записать в общем виде тепловой баланс точечной сварки, то можно ограничиться таким равенством:

$$Q_к + 2Q_{эм} = q_{тс} + q_м + 2q_э. \qquad (2.85)$$

Здесь, как уже неоднократно отмечалось, только слагаемое $Q_к$ представляет собой, с точки зрения расчета, наиболее стабильную величину. Все остальные вносят, каждое по-своему, в тепловой баланс иногда значительную неопределенность. Борьба с этими неопределенностями и с нестабильностью всех переменных и является целью при разработке технологии контактной точечной сварки.

На рис. 2.26 изображена классическая схема точечной сварки. Однако в реальной действительности создаются такие конструктивные сочетания, как, например, показанные на рис. 2.27, для которых форма расплавленного ядра — совсем не цилиндр. Ра-

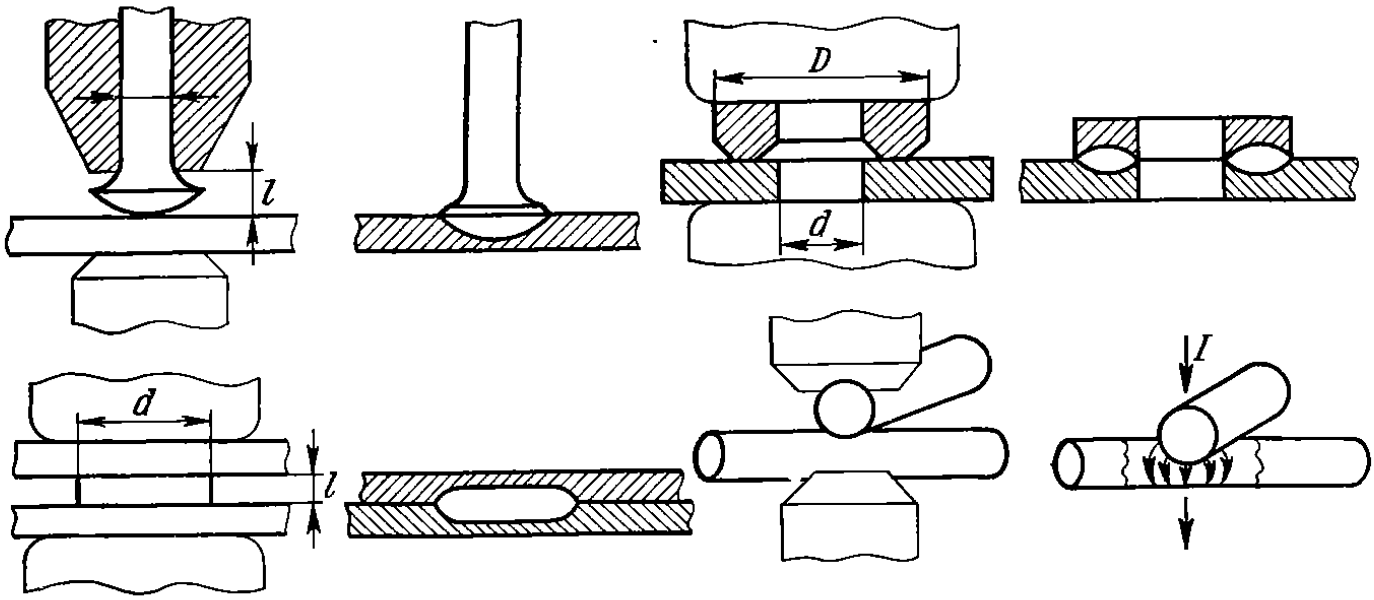


Рис. 2.27. Некоторые типы рельефно-сварных соединений

зумеется, в случаях такого рода тепловой баланс (2.85) может быть весьма своеобразным и формулы тепловыделения, если только такие формулы нужны, будут отличаться от (2.80). Конструктивные сочетания типов, приведенных на рис. 2.27, принято относить к разряду рельефной сварки, поскольку в каждом варианте свариваемый контакт отличается рельефным выступом той или иной формы. Выступы такого рода играют заметную роль концентраторов энерговыделения, за счет чего и удается осуществлять расплавление ядра разной формы. Это обусловливается не только конструкцией свариваемых деталей. Более существенное значение имеет распределение сварочного тока в процессе нагрева свариваемого (да и не только свариваемого) контакта.

Форма свариваемых деталей, магнитность или немагнитность металла, резкие изменения токопроводящих сечений проводника — все эти вещи, вместе взятые, создают иногда весьма сложную картину распределения тока в свариваемых деталях. Во многих случаях оно оказывается подобным тому, которое характерно для распределения механических напряжений по растягиваемым или сжимаемым деталям разной формы, с разными концентраторами напряжений.

Этот факт в некоторой мере поясняют модели, приведенные на рис. 2.28. На первой из них (рис. 2.28, *а*) показаны эпюры распределения сварочного тока по плоскостям *2—2* свариваемого и *1—1* несвариваемого контактов. При сильном эффекте шунтирования тока в соседнее ядро (рис. 2.28, *б*) эпюры токов резко меняют свою форму. На рис. 2.28, *г* показана разная степень концентрации тока относительно разной формы надрезов и изгибов проводящей шины. При окончательном формировании контакта (рис. 2.28, *д*) характерно уменьшение концентрационных пиков тока в тех плоскостях *2—3*, где плотности тока вообще весьма велики по сравнению с плоскостями *1—1*.

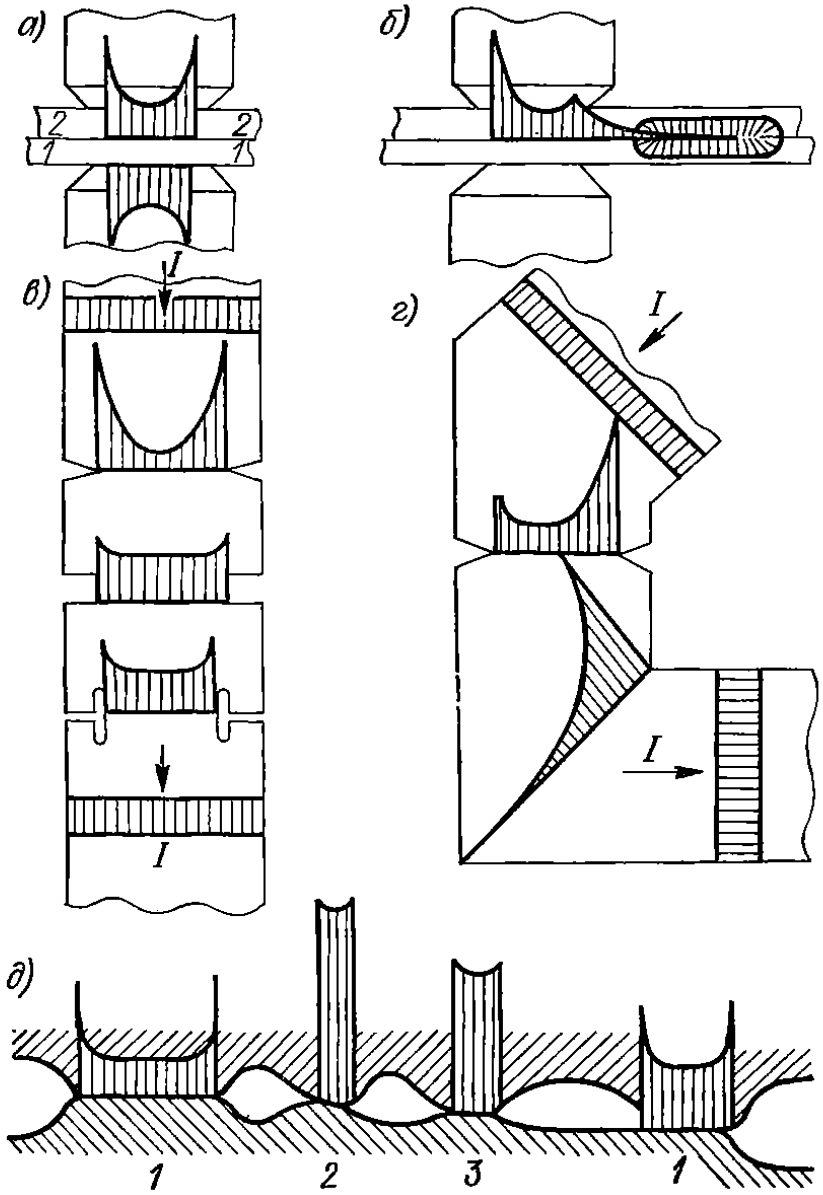


Рис. 2.28. Схемы возможных концентраций сварочного тока при одноточечном (*а*) и многоточечном (*б*) сварном соединении; при надрезах различной формы (*в*); при искривленных проводниках (*г*) и в плоскости контакта в момент включения тока (*д*)

2.5. Особенности нагрева металла при шовной сварке

Шовно-сварные соединения представляют практический интерес, если необходима не только определенная прочность, но и достаточная плотность или даже полная герметичность. Такого рода соединения могут быть получены заменой электродов точечных машин вращающимися роликами (рис. 2.29, здесь диаметр ролика показан значительно преуменьшенным по сравнению с толщиной свариваемых листов, кроме того, изображен только один верхний ролик). Рис. 2.29 иллюстрирует процесс сварки так называемым шаговым швом, когда при неподвижном ролике включается импульс сварочного тока, за счет которого происходит формирование единичной сварной точки. Сваривающий ролик поворачивается на некоторый угол (от штрихового изображения) и останавливается для постановки следующей точки. Линейное перемещение ролика осуществляется на такой шаг, чтобы получалось перекрытие предыдущей точки каждой последующей на размер k. Минимальный размер перекрытия k, согласно ГОСТ 15878—79, должен быть не менее $^1/_4$ от длины литого ядра, если толщина

листов более 0,6 мм. Для меньших толщин допускаются меньшие перекрытия. Собственно сваривающий ток $I_{св}$ (рис. 2.29) частично шунтируется в предыдущую точку.

В современной производственной практике наибольшее распространение получил цикл шовной сварки так называемым прерывистым процессом, когда ролики вращаются безостановочно, а сварочный ток включается на время $t_ш$ после некоторой паузы $t_п$. Каждая единичная точка в таком цикле получается удлиненной. На рассмотрении этого процесса следует остановиться, поскольку далеко не все понимают электротепловую картину прерывистого способа шовной сварки. Здесь особенно характерно проявляются два особых электрических эффекта, рассмотренные выше для точечной сварки: явление шунтирования сварочного тока и сжатие линий тока его собственным магнитным полем. Для анализа всей этой картины воспользуемся рис. 2.30. На рис. 2.30, *а* показана

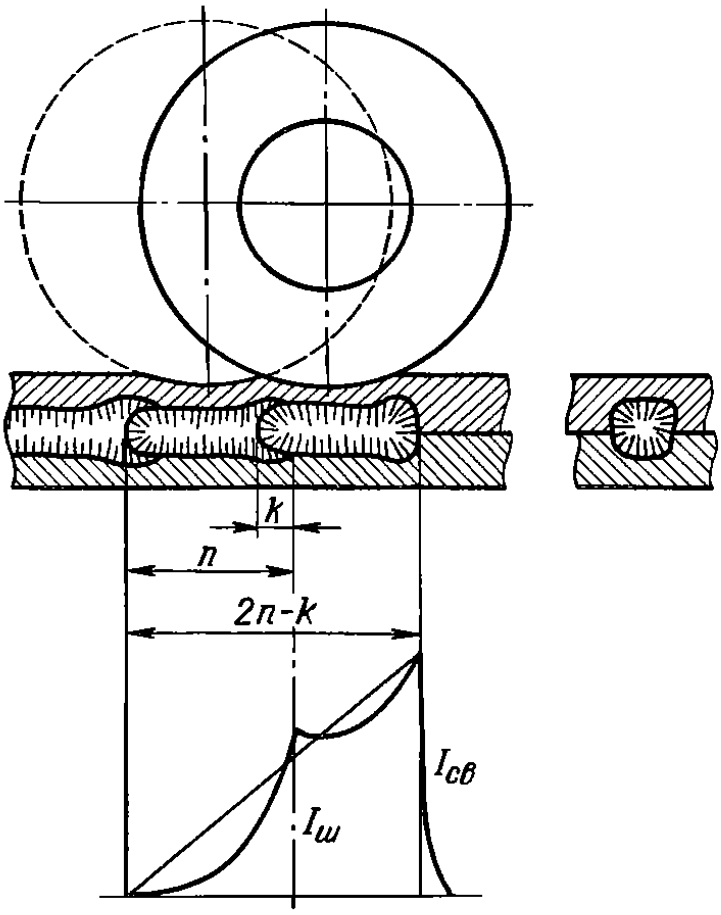


Рис. 2.29. Структура шовно-сварных соединений и схема шунтирования сварочного тока

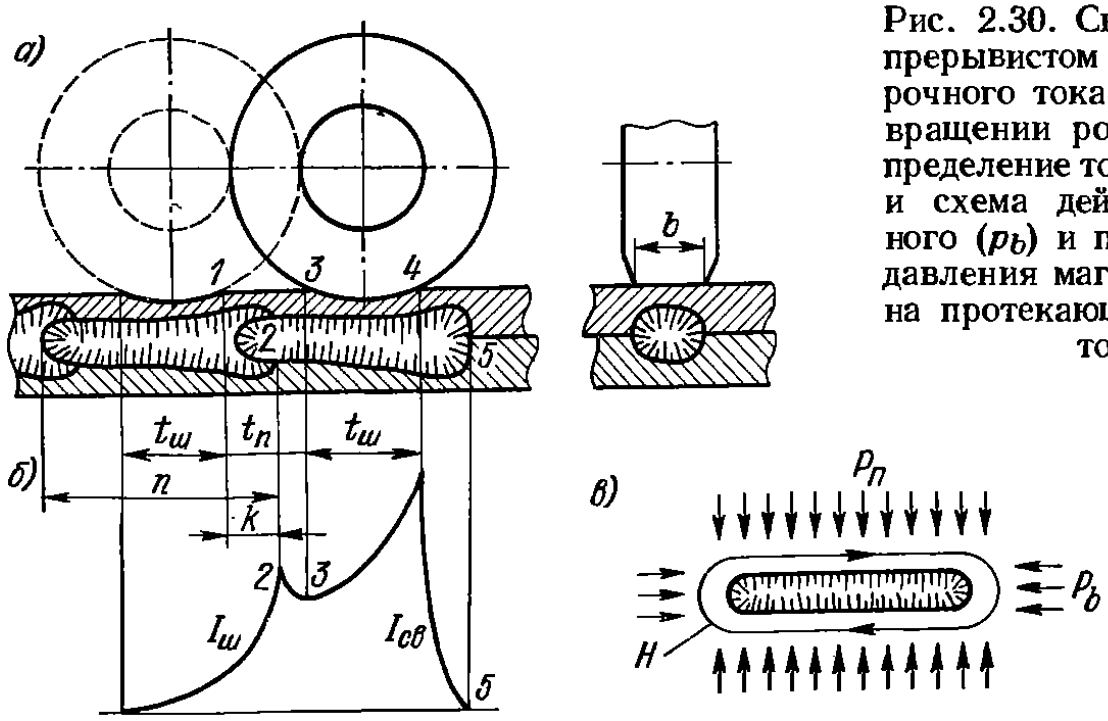


Рис. 2.30. Сварной шов при прерывистом включении сварочного тока и непрерывном вращении роликов (*а*), распределение тока в металле (*б*) и схема действия продольного (p_b) и поперечного ($p_п$) давления магнитного поля H на протекающий по металлу ток (*в*)

схема перемещения роликов (опять без соблюдения масштаба диаметра ролика и толщины свариваемых деталей). Непропорционально глубоко вдавлены ролики в свариваемые детали. Рассмотрим момент, когда ролики после сварки точки длиной n передвинулись из положения ролика, изображенного штриховой линией, в позицию, показанную сплошной линией. Он достаточно плотно контактирует с металлом по длине от линии *3* до линии *4*. В этот момент и включается импульс тока длительностью $t_ш$. Как видно из рисунка, за время $t_п$ (время вращения ролика без тока от линии *1* до линии *2*) успел образоваться непроваренный участок, от линии *2* до линии *3*. Вот этот участок и сваривается, но только за счет тока шунтирования $I_ш$, который по своей плотности распределяется в момент включения сваривающего тока по эпюре, показанной на рис. 2.30, *б*.

Как видно, ток шунтирования бесполезный и даже вредный при точечной сварке, для шовной сварки превращается в свою противоположность и оказывается решающим в деле создания плотного шва посредством перекрытия каждой последующей точкой точки предыдущей.

Не последнюю роль в деле шунтирования играет и эффект магнитного давления. Ролик — это не электрод точечной машины. Его контактирование с металлом происходит по удлиненной площади, когда размер n больше ширины ролика b (иногда значительно). Это и является причиной неравномерности давления, оказываемого на линии тока собственным магнитным полем этого тока. А это приводит к вытягиванию тока и в сторону шунтирования его в предшествующую точку, и в сторону движения ролика в еще несваренный участок.

Вот по этим двум причинам (шунтированию и магнитному сжатию тока) и удается время паузы $t_п$ (движения ролика без тока) устанавливать не только равным времени включения $t_ш$, но иногда даже делать $t_п > t_ш$, и, несмотря на это, получать плотный шов с достаточным перекрытием k.

Рассмотрим количественную сторону процесса сварки швом посредством прерывистого включения тока. Согласно ранее исследованным соотношениям, был определен физический смысл критерия К. Так, согласно (1.47) и (2.83) числитель этого критерия — это та энергия, которую мы вводим в зону свариваемого контакта, а знаменатель — энергия, теряемая за счет теплопроводности в окружающую массу металла. Для шовной сварки можно считать

$$Q_к = I^2 \rho_т h t_ш / d^2_{тш},$$

где I — ток вторичного контура, т. е. сваривающий и шунтирующий; $\rho_т$ — удельное сопротивление металла в момент его плавления; h — высота расплавленного ядра; $d_{тш}$ — диаметр такой единичной точки, которая по площади эквивалентна тоже единичной, но некруглой точке, какую ставит неподвижный ролик.

Потери энергии в металл, которые происходят уже не только за время сварки $t_ш$, но и за время паузы $t_п$,

$$q_м = T_{пл}\sqrt{\lambda\gamma c}\, S\sqrt{t_ш + t_п}.$$

В этом равенстве площадь S, через которую теплота отводится теплопроводностью,

$$S = n\delta,$$

где δ — толщина свариваемого металла, а длину точки n, как видно, приближенно можно выразить через линейную скорость движения роликов v и время включения тока $t_ш$, т. е. $n = vt_ш$. Тогда $S = vt_ш\delta$.

Если так же, как и при точечной сварке, написать

$$d_{тш}^2 \equiv P/\sigma_т,$$

где P — сила сжатия роликов, а $\sigma_т$ — предел текучести холодного металла, то получим

$$К_ш = \frac{Q_к}{q_м} = \frac{I^2\rho_т h t_ш}{d_{тш}^2 T_{пл}\sqrt{\lambda\gamma c}\, S\sqrt{t_ш + t_п}} = \frac{I^2\rho_т h\sigma_т t_ш}{T_{пл}\sqrt{\lambda\gamma c}\, vt_ш\delta\sqrt{t_ш + t_п}P}; \quad (2.86)$$

$$К_ш = \frac{I^2\rho_т h\sigma_т}{T_{пл}\sqrt{\lambda\gamma c}\,\delta v\sqrt{t_ш + t_п}P}. \quad (2.87)$$

По аналогии с точечной сваркой справедливо, по-видимому, силу тока I назначать по формуле типа (см. гл. 4)

$$I = Ad_{тш}/\sqrt{\rho_т}, \quad (2.88)$$

что будет проверено на расчетных примерах.

Глава 3

ТЕХНОЛОГИЯ СТЫКОВОЙ СВАРКИ

3.1. Выбор способа стыковой сварки для типовых соединений

Для каждого предполагаемого сварного соединения определяется тот вид энергии или комбинация нескольких ее видов, которую решено использовать. Выбор энергии уже предопределяет основные элементы технологии и, в первую очередь, подготовку деталей к вложению намеченной энергии. Однако важен не просто избранный вид энергии, но и программа ее использования. Вот эта часть технологии определяется, как принято говорить, режимами сварки, которые почти полностью и обеспечивают формирование сварных соединений.

Всякий раз, когда рассматривается вопрос об изготовлении каких-то изделий посредством сварки, технолог вынужден решать одну из следующих двух задач или даже обе одновременно.

1. Способно ли имеющееся оборудование обеспечить такую технологию сварки, которая обеспечит изготовление готового изделия, полностью удовлетворяющего техническим условиям. В этом случае выбор технологии полностью определяется характеристиками и параметрами имеющегося оборудования; творческие поиски новых технологических способов оказываются чаще всего весьма стесненными.

2. Для заданного нового изделия необходимо проектировать наиболее рациональную технологию сварки и по оптимальным технологическим режимам закупить готовое или спроектировать новое сварочное оборудование. Проектирование нового оборудования иногда выливается в создание особых специализированных машин или в проектирование каких-то дополнительных устройств, совершенствующих готовые сварочные машины — задача технологически значительно более творческая.

При решении любой из этих двух задач технолог перед «заказчиком» обязательно ставит целый ряд вопросов. Вот основные из них:

1) конструкция изделия со всеми ее размерами;

2) металл, из которого должно быть изготовлено изделие;

3) условия эксплуатации будущего сварного изделия (нагрузки, среда службы, сроки службы и т. д.);

4) требуемая производительность по выпуску сварного изделия;

5) какова должна быть конкурентоспособность изделия, изготовленного по новой технологии, по сравнению с ранее используемой;

6) различного рода дополнительные требования: экологические, оборонные, престижные и др.

Ответы на эти вопросы позволяют технологу уверенно назначать наиболее рациональную технологию для заданного изделия.

О каком бы стыковом соединении ни шла речь, идеальным требованием для него всегда остается желание получить прочность, равную целому металлу. Следовательно, во всех случаях необходимо стремиться к созданию структуры плоскости сваренного контакта, в самой большей степени похожей на межкристаллитные границы целого металла. Но это далеко не все. Физическая структура, размеры зерен и химический состав металла вокруг плоскости контакта и в самой плоскости также не должны сильно отличаться от глубинных слоев свариваемых деталей.

Если именно такие требования являются идеальными, то не всякая технология способна этим требованиям удовлетворять. Выше уже неоднократно подчеркивалось, что полный цикл сварки состоит из операций подготовительных и завершающих, сварочных. Этот тезис весьма очевиден: можно как угодно идеально

подготовить холодные детали, как угодно совершенно их нагреть (или подогреть), и все это идеальное ничего не будет стоить, если завершающая операция механического давления будет проведена неправильно и нерационально. Возникает вопрос: спасают ли от этой опасности существующие во всех пособиях и инструкциях нормативные рекомендации осадочных давлений? Спасают. В небольших границах.

Дело здесь вот в чем. Специалисты-электромашиностроители за период своей многолетней практики с высокой степенью совершенства отработали электрическую часть контактных машин, поскольку все время считалось, что решающим фактором сварки является только электронагрев деталей. В действительности же, как это и было показано выше, электронагрев является условием необходимым, но еще не достаточным. Условие достаточности определяет программа приложения механических давлений. Для современных контактных стыковых машин она весьма бедна, примитивна и совершенно не гармонирует с гибкостью электрических систем машин.

Приведенные выше теоретические решения показывают, что табличные рекомендации сил сжатия, или норм давлений без учета скорости действия этих сжимающих сил, совершенно не гарантируют каких-либо надежных показателей прочности сварных соединений. Медленно прикладываемые осадочные давления, особенно при сварке деталей больших сечений, недостаточно справляются даже с подготовительной задачей — удаления из плоскости контакта оксидных загрязнений. При стыковой сварке оплавлением деталей больших сечений весьма часто оказывается, что электрическая часть машины способна создать достаточный нагрев. Однако механическая система мала по своей мощности и осуществляет сжатие совершенно недостаточное.

Во всех существующих книгах предписываются рациональные нормы осадочных давлений. Однако ни одна из существующих стыковых машин не снабжается измерителем давления. Таким образом, технолог достаточность сжимающих сил определяет по структурам готовых сваренных образцов, а не по измерительным приборам. В этой книге хочется избежать нормативных рекомендаций по силам осадки. Энергетическое равенство (2.47) дополним некоторыми слагаемыми:

$$T_{\text{св}} = \frac{I^2 (R_{\text{к}} + R_{\text{м}}) \sqrt{t_{\text{н}}}}{4m \sqrt{\lambda\gamma c}\, S} + \frac{U_{\text{оп}} I_{\text{оп}} \sqrt{t_{\text{оп}}}}{4m \sqrt{\lambda\gamma c}\, S} + \\ + \frac{p_{\text{ос}} h_{\text{ос}}}{4m \sqrt{\lambda\gamma c}\, \sqrt{t_{\text{ос}}}} + \frac{p_{\text{тр}} \pi d n}{4 \cdot 60 m \sqrt{\lambda\gamma c}\, \sqrt{t_{\text{тр}}}} + \\ + \frac{p_{\text{ос}} \xi k}{4m \sqrt{\lambda\gamma c}\, \sqrt{t_{\text{уд}}}} + \frac{1}{6knt_{\text{сдв}}/(\eta_0 \varepsilon^2) + 1/T_{\text{пл}}}. \qquad (3.1)$$

Обратим внимание на то, что согласно четвертому слагаемому вместо осевого осадочного давления можно использовать осадку

трением, осуществляя такой поворот на путь πdn, где n может составлять несколько оборотов, один оборот или только часть оборота. Таких машин пока не строится вообще, а вместе с тем сдвиговая осадка трением потребует в несколько раз меньшей осадочной силы, чем сжатие обычное, но третьему слагаемому. Мало того, осадка может быть приложена в соответствии с пятым слагаемым и как ударная из одного, нескольких или многих ударов, каждый из которых будет обеспечивать малую осадку ξ. Осадка по такой программе — это процесс многократно ударный, с малой частотой ударов.

Равенство (3.1) достаточно отчетливо показывает, что стыковая сварка пока что замерла на статических программах осевого осадочного давления. Все стыковые машины в настоящее время только и строятся в расчете на эти программы. Однако нетрудно видеть, что для многих деталей, подвергаемых сварке, стыковые машины могут быть переделаны под комбинированные осадочные давления. Исследуя равенство (3.1), следует обратить особое внимание на то, что любой способ осадочной операции согласно третьему, четвертому, пятому и особенно шестому слагаемым максимально эффективен при тем меньших давлениях $p_{\text{ос}}$ и $p_{\text{тр}}$, чем с большей скоростью (малые $t_{\text{ос}}$, $t_{\text{тр}}$, $t_{\text{уд}}$ и $t_{\text{сдв}}$) эти давления прикладываются к свариваемым деталям. Высокая скорость приложения осадочных давлений позволяет, таким образом, весьма снизить силы осадки и облегчить механическую часть машин. В то же время при относительно небольших давлениях осадки нужна ориентация на такие электротепловые режимы, при которых плоскость контакта вследствие пропускания тока получает температуру точки плавления или даже выше ее.

Все это говорит о том, что в электрической контактной сварке надо главное внимание уделять не только электротепловым процессам и электрическим системам стыковых машин, но и операциям механической осадки и механическим системам машин. Основанием является равенство (3.1), которое показывает, что технолог может исключительно точно, тонко и независимо регулировать вложение в контакт электрической и механической энергии, как и других видов энергии.

Так, в частности, ранее было показано, что ударно-стыковая сварка обеспечивает сварное соединение, наиболее близкое к идеальному. К сожалению, этот процесс приложим только к деталям сравнительно малых сечений: тепловыделение искрового разряда не может быть распределено на большую площадь. Этого не позволяет делать сжимающее магнитное поле.

Взрывоискровой процесс оплавления отличается от искрового тем, что по торцам свариваемых деталей любой площади последовательно и одновременно во множестве возникают искровые разряды, и каждый из них дает на металле кипящий слой. Однако весь процесс растянут во времени, идет на воздухе и, следовательно, ему присущи неизбежные окислительные реакции по плоскости

торцов и даже изменение химического состава металла на некоторую глубину от торцов. Сварное соединение, изготовленное методом оплавления, оказывается далеким от идеального, особенно, если осадка была замедленной и недостаточной по силе. Последствия такого плохого использования механической энергии особенно часты при сварке больших сечений, как компактных, так и развитых.

Стыковая сварка методом сопротивления стальных деталей вообще ни при каких режимах, рекомендуемых современной литературой, не может сохранить структуру металла, мало отличающуюся от исходной. Однако равенство (3.1) подсказывает и другие режимы для стержней малых диаметров (вероятно, не более 10 мм), которые могут оказаться весьма желательными, особенно для цветных металлов. В чем суть этих режимов? Электронагрев должен быть осуществлен возможно более кратковременным включением, но при значительной силе тока. Подбор режима нагрева следует производить опытным путем, помня о следующих теоретических ограничениях: в плоскости контакта температура должна превысить точку плавления на 100—200 °С. Тогда на торце каждого стержня окажется тонкий слой расплава. В этот момент должно быть осуществлено быстрое сжатие, но силой, значительно меньше той, какая рекомендуется в современных руководствах. Задача: выдавить жидкий металл из плоскости контакта, но так, чтобы тончайший слой расплава в стыке был сохранен. Если этот тончайший слой расплава затронет только несколько кристаллических слоев на торце каждого стержня, такое соединение будет весьма близким к идеальному, поскольку кратковременный импульс тока не успеет испортить исходную структуру основного металла.

Рассмотрим, как конструкция и размеры деталей определяют выбор технологии стыковой сварки. На рис. 3.1 показаны некоторые типовые стыковые соединения. Здесь одновременно полезно обратить внимание и на форму, и на размеры свариваемых деталей. Первый тип соединения (рис. 3.1, *а*) в зависимости от абсолютных и относительных размеров B и δ может свариваться по-разному. При $B = \delta$, если при этом площадь сечения не превышает $S = 1$ см^2, вполне возможна ударно-стыковая сварка разрядом кон-

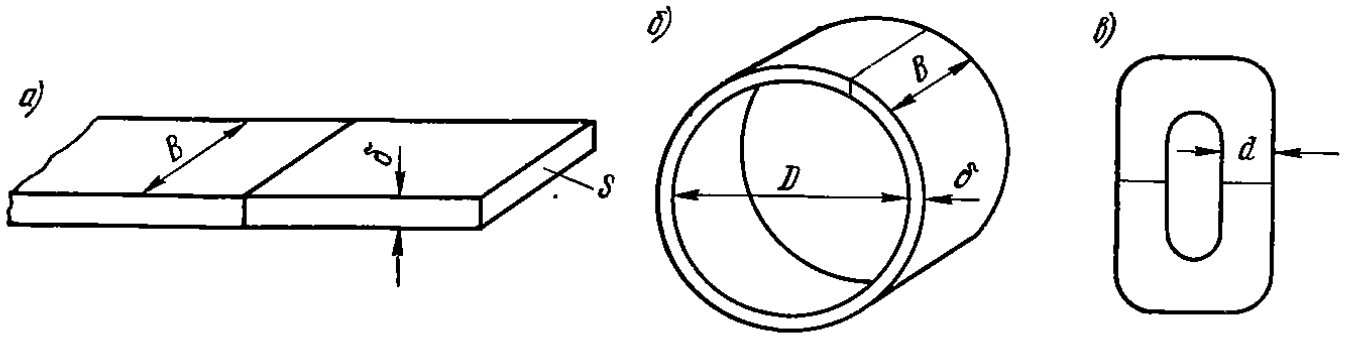


Рис. 3.1. Типовые сварные стыковые соединения

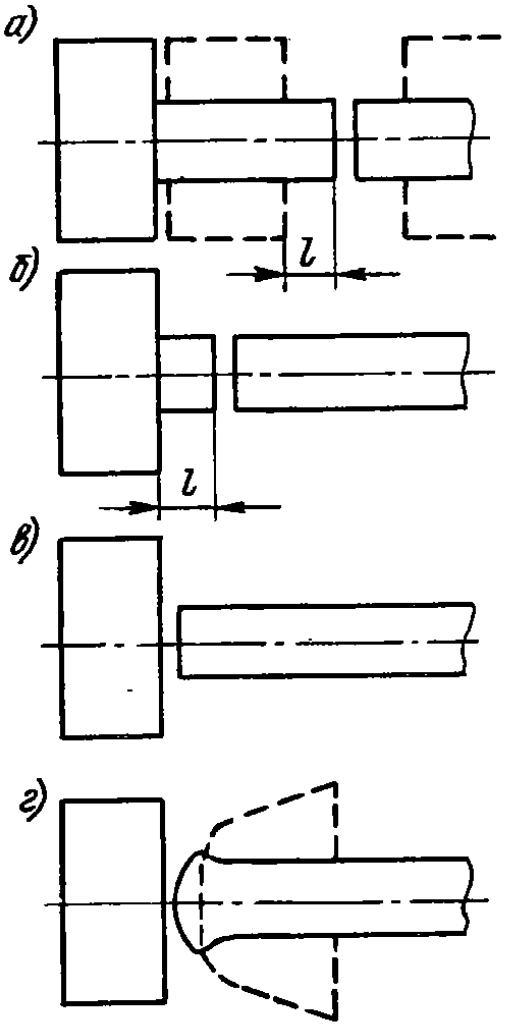


Рис. 3.2. Образцы подготовки разноразмерных деталей к различным способам стыковой сварки

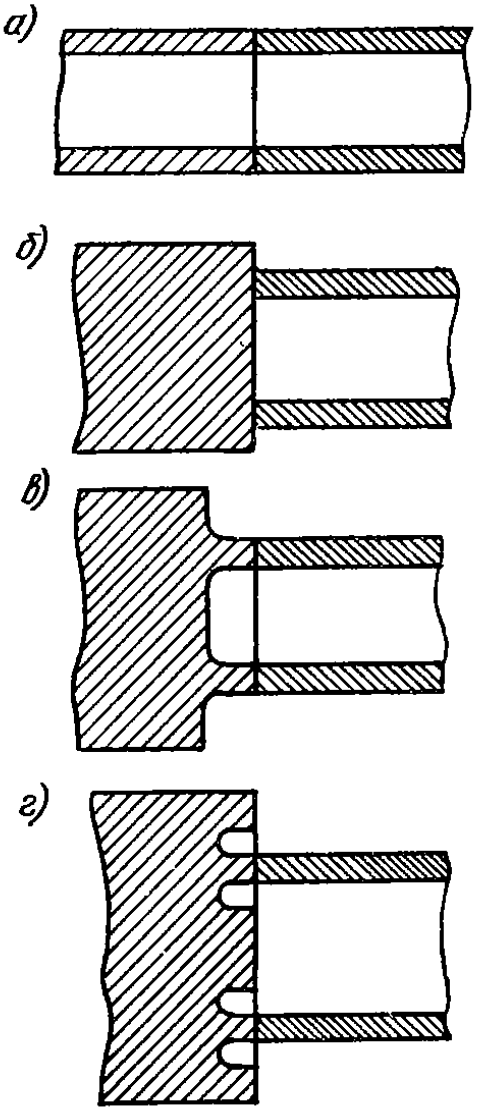


Рис. 3.3. Образцы подготовки к стыковой сварке трубчатых соединений

денсатора. Возможна и сварка методом сопротивления. Однако при $B \gg \delta$, и, если при этом δ более 1 мм, единственно возможной становится стыковая сварка методом оплавления.

Большое число изделий кольцевой формы (рис. 3.1, *б*) также может быть сварено стыковой сваркой. Для них уже надо учитывать и размер D (для примера можно привести ободья автомобилей и корпуса железных бочек или стиральных машин).

Еще один тип изделий создал свою отраслевую технологию стыковой сварки — это цепи. Их размеры весьма многообразны, особенно корабельных цепей. Для звеньев крупных размеров (диаметр $d > 10$ мм, рис. 3.1, *в*) оказывается рациональным осуществлять сварку из двух половин, с двумя стыковыми швами.

Следующей типовой серией сварных конструкций можно считать соединение стержней с плитами или какими-либо деталями массивной формы (рис. 3.2). Первый вариант соединения показан на рис. 3.2, *а*, когда массивная деталь имеет хвостовик большой длины, по крайней мере более $(4 \div 5)\, d$. Детали такого рода мо-

жно сваривать любым способом: и методом сопротивления, и методом оплавления. При относительно меньшем хвостовике, длиной порядка $l = d$ (рис. 3.2, *б*), можно успешно произвести сварку только методом оплавления. Здесь необходима более высокая концентрация энергии в свариваемом контакте. Вариант соединения, показанный на рис. 3.2, *в*, может быть выполнен только искровым разрядом, т. е. с использованием самой высокой концентрации энергии в контакте. Проволоки диаметром от 2 до 5 мм могут привариваться к массивным деталям (рис. 3.2, *г*) методом сопротивления, импульсом переменного тока, если торец проволоки подготовлен в виде бульбы с шаровой поверхностью торца.

Процессы стыковой сварки широко применяются для трубчатых соединений; диаметры труб могут быть от 20 мм до 1420 мм, с толщиной стенок от 0,5 до 18 мм, что и определяет большое разнообразие технологических процессов сварки труб, даже без учета марки свариваемого металла. Если свариваются встык трубы одного и того же диаметра и толщины стенок (рис. 3.3, *а*), то применяется сварка непрерывным оплавлением. Сочетание массивной детали с трубой (рис. 3.3, *б*) может быть создано только для труб малого диаметра, посредством энергии искрового разряда. Процессом оплавления могут свариваться детали по схеме, показанной на рис. 3.3, *в*. Соединения, приведенные на рис. 3.3, *г*, не могут быть рекомендованы ни в каких случаях, так как они кроме неизбежной концентрации напряжений получают весьма безобразный внешний вид и требуют механической обработки.

Трубы малого диаметра особенно характерны для силовых трубопроводов, большого — для магистральных газо- и нефтепроводов.

3.2. Формирование соединений при различных способах стыковой сварки

Если рассматривать только современные и широко используемые процессы нагрева стыковых соединений, то придется остановиться на трех:

1) электроискровой конденсаторный (внешний вид готового сварного стыка показан на рис. 3.4, *а*);

2) нагрев методом оплавления (рис. 3.4, *б*);

3) нагрев методом сопротивления (рис. 3.4, *в*).

На рис. 3.4 отмечены расстояния $x'_{од}$, $x''_{од}$, $x'''_{од}$ от контактной плоскости до зоны, в которой металл от действовавшей осадочной силы не претерпел никаких пластических деформаций. В этом месте сваренная деталь сохранила по диаметру первоначальный, досварочный размер. Назовем эту зону зоной нулевой деформации. На рис. 3.4 только размер $x_{од}$ приблизительно выдержан в натуральном масштабе по отношению к δ: диаметру круглой проволоки и стержня или толщине свариваемой полосы, листа, или даже стенки трубы.

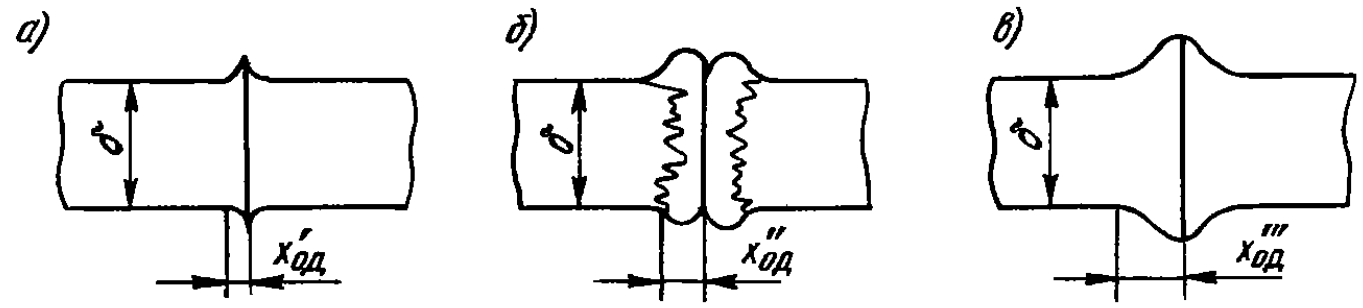


Рис. 3.4. Формы стыковых соединений в результате ударно-стыковой сварки (*а*), методом оплавления (*б*) и методом сопротивления (*в*)

Как видно, наибольшее расстояние $x'''_{од}$ фиксируется для нагрева методом сопротивления, при котором глубина слоя, где температура повышается от торца в стержень, наибольшая. Для нагрева методом сопротивления глубокий прогрев определяется не столько теплопроводностью от торца, сколько подогревом стержня выделением теплоты за счет его собственного объемного сопротивления. Уже при плотности тока около $1{,}2 \cdot 10^8$ А/м^2 стальной стержень без участия контактного сопротивления будет доведен до плавления за 1 с. Плотности тока такого именно значения для сварки методом сопротивления могут считаться предельно допустимыми, и то только при условии хорошо подготовленного контакта, например по схеме, приведенной на рис. 3.2, *г*.

Следует иметь в виду, что всякий нагрев стержней и вообще любых деталей в губках стыковой машины происходит под действием почти постоянного по величине напряжения холостого хода. Сила же тока нагрева по мере увеличения удельного сопротивления металла падает. Если идет не просто нагрев, а сварка стержней, то температура нагрева контакта $T_к$ и самих стержней $T_с$ в сумме получает своеобразное изменение: действующая и измеряемая в плоскости контакта температура ($T = T_к + T_с$) растет приблизительно пропорционально половинной степени времени включения тока.

Форма готового сварного соединения, изготовленного методом сопротнвления, определяется, в первую очередь, режимом электронагрева, а затем и операцией сжатия стержней. На этом вопросе следует остановиться несколько подробнее. Здесь снова можно обратить внимание на необходимость ввести в понятие режима операции осадки не только величину давления, но и самое теперь главное — скорость осадки. Действительно, энергия деформации при осадке нагретых стержней

$$\sigma_{деф} = P_{ос} h_{ос},$$

где $P_{ос}$ — сила осадки, $h_{ос}$ — размер осадки, м. На основе равенства (1.25)

$$P_{ос} h_{ос} = \eta \varepsilon \frac{d\varepsilon}{dt} V.$$

Поскольку $V = Sh_{oc}$ и $P_{oc} = pS$, то осадочное давление определится так:

$$p = \eta\varepsilon^2/(2t). \tag{3.2}$$

В этом равенстве относительная деформация

$$\varepsilon = h_{oc}/H, \tag{3.3}$$

где H — начальное расстояние между губками.

Из формул (3.2) и (3.3) получаем

$$p = \eta h_{oc}^2/(2H^2t), \tag{3.4}$$

где осадочное давление p — в МПа. В этом случае t — в с, h_{oc} и H — в м, коэффициент внутреннего трения η — в Дж·с/м^3.

Физический смысл формулы (3.4) в следующем: при любых температурных состояниях свариваемых стержней может быть произведена осадка с любой скоростью и тем самым будет обеспечена заданная желательная деформация. Этим самым провозглашается весьма существенный технологический принцип: нет границ в использовании давлений для стыковой сварки. Они могут быть любыми: от самых малых, используемых пока что в существующей практике контактного нагрева, до самых больших, уровня взрывных процессов.

Желательная или необходимая деформация обусловливается прежде всего тем, насколько хорошо она обеспечит вынос из плоскости контакта всех нежелательных загрязнений металла. В конечном же итоге деформация создает в массе глубинных чистых слоев металла прочную металлическую связь. Эти ответственные технологические эффекты определяют не только величинной осадочного давления, но и для каждого температурного состояния стержней — скоростью действия осадочной силы. Практические расчеты по формуле (3.4) вполне возможны. Конструкторам будущих стыковых машин они даже понадобятся. Численные значения коэффициента внутреннего трения η могут быть приняты, вероятно, те, которые получены в гл. 1. Затруднения будут вызваны тем, что значения η надо принимать для каких-то средних температур нагрева не только плоскости контакта, но и некоторого, не очень по толщине определенного, слоя металла вокруг плоскости контакта.

Формула (3.4) может дать достоверное значение осадочного давления для деформации в ограниченных пределах зажимных губок, если учитывать еще формулы (1.20) и (1.21): полученные по формуле (3.4) значения давления надо умножить на скобки $\left(1 + \frac{d}{6h}\right)$ или $\left(1 + \frac{2}{3}\frac{S}{uh}\right)$. Достоверность формулы (3.4) можно проверить по данным И. Б. Баранова для холодной сварки. Конкретный пример сварки медных прутков площадью сечения 1 см^2 показал, что осадочное давление должно быть равным 1000 МПа. Для холодной меди в гл. 1 было определено значение $\eta =$ $= 1200$ Дж·с/см^3. Осадка стержней происходит приблизительно

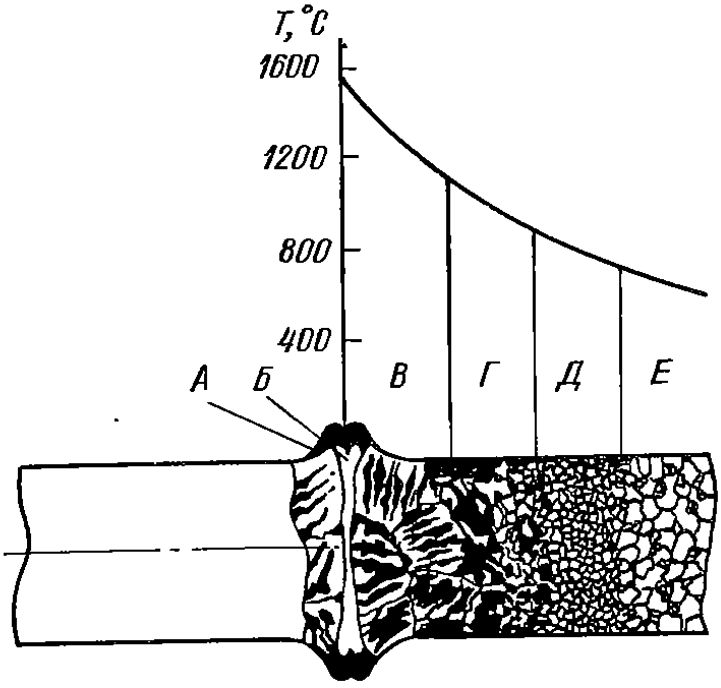


Рис. 3.5. Структура стальных стержней, сваренных методом оплавления

за 1 с. Относительная деформация при холодной сварке, как известно, высокая — около 0,9 (губки сходятся почти вплотную). При этих условиях, согласно формуле (3.4), получаем

$$p = 1{,}2 \cdot 10^9 \cdot 0{,}9^2/(2 \cdot 1) = 496 \text{ МПа}.$$

Это значение давления надо умножить на скобку $[1 + d/(6h)]$. Размер h, т. е. конечное расстояние между губками, не более чем $0{,}2d$. Отсюда осадочное давление

$$p = 496/(1 + 1/1{,}2) = 910 \text{ МПа}.$$

При $h = 0{,}1$ давление увеличивается до 1320 МПа. Эти подсчеты хорошо показывают не только физический смысл формулы (3.4), но и достоверность расчетов по ней.

Чаще всего стыковая сварка методом сопротивления применяется для сварки стальной, медной и алюминиевой проволоки диаметром от 2 до 10 мм. Стержни бóльших сечений и вообще детали больших развитых сечений — это уже область стыковой сварки методом оплавления, и притом преимущественно стальных деталей. В настоящее время существует более 2000 марок различных сталей. Описание особенностей технологических процессов сварки даже однотипных сортов стали вряд ли возможно и целесообразно, поскольку речь должна идти не только о традиционных режимах, но и тех перспективных, о которых в этой книге говорилось не однажды.

Рассмотрим некоторые принципы поведения стальных деталей при их стыковой сварке. Типовая структура деталей, сваренных методом оплавления, схематически показана на рис. 3.5. На нем условно изображена полого растянутая в направлении оси стержней кривая температур, зафиксированных в стержнях в момент выключения тока. В соответствии с этим распределением температуры по сечению правого стержня показана схема типовой структуры металла вокруг сварного соединения и в нем самом. В результате сжатия стержней жидкий окисленный металл из плоскости контакта выдавливался и распределялся по всей окружности стыка в виде кольца $А$. Плоскость контакта почти всегда характеризуется белой нетравящейся прослойкой $Б$, самой узкой посередине, с утолщением к наружным волокнам. Имея в виду закономерность распределения давления по сечению стержня [см. формулу (1.19)],

можно понять разнотолщинность полоски. Об этой нетравящейся полоске речь будет в дальнейшем. Следующая зона *В* характеризуется большим размером зерна. Здесь температура была выше 1100 °С, структура такого металла называется перегретой. Металл с таким зерном обладает пониженной пластичностью. Этот слой желательно иметь возможно более тонким. В зоне *Г* температуры таковы, что при медленном охлаждении создается постепенный переход к мелкозернистой структуре. Металл в зоне *Д* нагревался до температур несколько выше Ac_3 и потому претерпел полную перекристаллизацию. Структура металла в этой зоне мелкозернистая. Между зоной *Д* и зоной *Е* нагрев был выше точки Ac_1, но ниже Ac_3. Здесь наблюдается только частичная перекристаллизация. В зоне *Е* не наблюдается никаких структурных изменений. Полная структурная картина стержней, приведенная на рис. 3.5, показывает, что пластические свойства и следовательно, динамическая вязкость от слоя к слою меняются.

Рассмотрим структурные особенности углеродистых и легированных закаливающихся сталей с помощью графиков твердости (рис. 3.6). Практически при стыковой сварке скорости охлаждения всегда получаются выше тех, которые создают те или иные закалочные структуры, поэтому свариваемые стержни из высокоуглеродистых и легированных сталей всегда приобретают в зоне шва ту или иную закаленную структуру.

Распределение твердости по кривой *1—0—1* соответствует случаю сварки стержней, закаленных на высокую твердость. Как видно, в районе точки *0* закалка будет снята, т. е. в этой зоне температура будет соответствовать температуре отжига. Падение твердости в самом контакте для всех кривых объясняется неизбежным обезуглероживанием оплавляемых поверхностей стержней. Обезуглероженный слой располагается обыкновенно в пределах нетравящейся полоски *Б*, показанной на рис. 3.5.

Кривая твердости типа *2—0—1* может соответствовать случаю сварки холоднокатаной (нагартованной) и умеренно закаливающейся стали. Сильный наклеп при нагреве в зоне точки *0* оказался полностью снятым, но высокий нагрев вблизи контакта (точка *2*) при соответствующей скорости охлаждения создал структуру умеренной закалки на троостит или сорбит.

Кривая твердости *3—0—1* может получиться при сварке сильно наклепанного металла, например малоуглеродистой

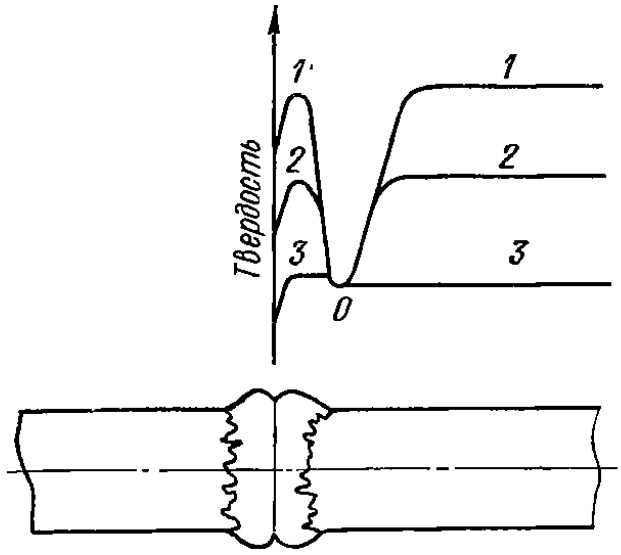


Рис. 3.6. Графики возможного распределения твердости в стальных стержнях, сваренных методом оплавления

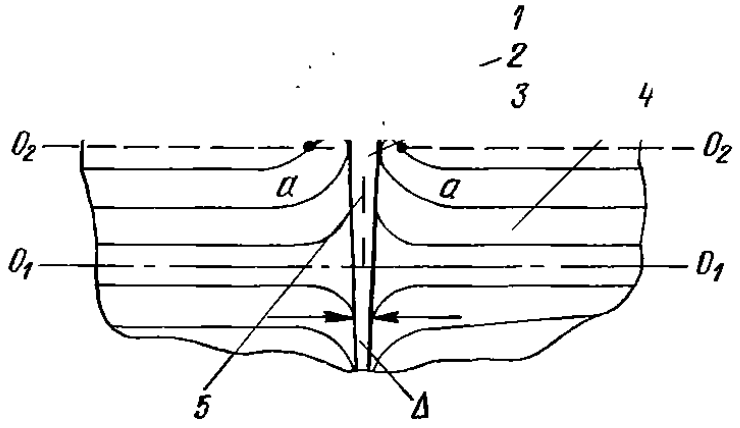


Рис. 3.7. Структурное строение стыкового соединения, сваренного методом оплавления

стали, или нагартованного алюминиевого сплава АМг. В этом случае нагрев до любых температур выше точки перекристаллизации полностью снимает наклеп.

Возможны и другие структурные комбинации. Например, если кривая твердости получилась *1—0—2* или даже *1—0—3*, то это говорит о том, что стержень из металла, склонного к закалке, поступил на сварку в отожженном состоянии и получил неизбежную сильную *(1—0—3)* или умеренную *(1—0—2)* закалку в зависимости от состава стали и скоростей охлаждения.

Типовую структурную схему соединения, сваренного методом оплавления, можно представить по рис. 3.7. При глубоком травлении полированного шлифа четко фиксируется волокнистое строение прокатного металла *4*, наибольшие усилия сжатия по оси стержней. Давления в краевых волокнах оказываются настолько малыми, что в зоне *2* металл имеет рыхлое строение. Здесь чистый металл в значительной степени перемешивается с окисленным *1*, который выплескивается во время оплавления в результате сжатия. В зоне *2* появляются даже усилия обратного знака, разрывающие металл. Искривления волокон в зоне *2* настолько сильны, что при срезании верхних слоев металла по плоскости $O_2—O_2$ в районе стыка появляются точки *a—a*, являющиеся границами волокон металла. Эти точки представляют собой дополнительные концентраторы напряжений при ударных испытаниях и испытаниях на изгиб. Они в значительной степени определяют известную для стыковой сварки нестабильность показателей прочности на удар и изгиб механически обработанных образцов.

Особо следует отметить в структурной схеме прослойку *3*, которая остается белой и нетравящейся. Ее ширина Δ увеличивается к периферии образцов и уменьшается к осевой линии $O_1—O_1$. Эта белая нетравящаяся полоска для современного металловедения представляет собой пока неразрешенную загадку. Специалисты самых различных областей, обнаруживая эти полоски на металле, долгое время были убеждены, что такие структурные картины нигде больше не повторяются. Дальнейшие исследования позволили отметить эту нетравящуюся структуру в различных условиях и при различном воздействии на металл.

Белая нетравящаяся полоска всегда получается на поверхностях, обработанных электрической искрой. Однако она фиксируется и при полном отсутствии электрических разрядов, например при скоростной механической обработке металла. Мало того, аналогичные слои обнаруживаются на поршневых кольцах двигателей внутреннего сгорания, на трущихся поверхностях автомобильных рессор. Зафиксированы белые нетравящиеся полоски и на поверхностях высокоуглеродистых пластин, сваренных друг с другом посредством мощного ударного давления, осуществленного взрывом. Обнаруживаются белые нетравящиеся полоски и при газопрессовой сварке.

Наконец, нетравящаяся полоска является почти обязательной прослойкой при стыковой сварке оплавлением не только различных марок конструкционных и легированных сталей, но и алюминиевых сплавов. При сварке сталей наиболее приемлемым считается мнение о нетравящейся полоске как о чисто ферритной прослойке, получающейся в результате обезуглероживания металла. Но эффект обезуглероживания может быть характерным лишь для газопрессовой сварки, поскольку в ней не действуют никакие дополнительные электромагнитные, электроискровые и ударные механические силы. При стыковой сварке оплавлением все эти силы действуют и притом в значительных масштабах. Эти-то силы и являются в данном случае главными, а не второстепенными. К сожалению, роль этих главных сил по сути дела никем в достаточной мере не изучалась.

Наличие белой нетравящейся полоски — это не просто структурный контраст. В ней обнаруживаются микротрещины *5* (рис. 3.7). В изломе они фиксируются в виде округлых пятен — островков несплавления. Микродефекты такого рода содержатся только в слое белой полоски и, видимо, с ней органически связаны. Ширина полоски Δ уменьшается по мере увеличения осадочного давления. Так, в частности, при давлениях для низкоуглеродистой стали выше 60 МПа, белая полоска исчезает. Она выдавливается и тем успешнее, чем с большей, возможной для современных машин скоростью прикладывается осадочная сила. Полоска будет выдавливаться и при осадке с вращением. Такого рода машины несомненно будут созданы.

3.3. Расчет режимов стыковой сварки

Определим, какие именно параметры режимов сварки необходимо рассчитывать и какие только желательно. При этом важно знать, с какой точностью их предполагают рассчитать и с какой сейчас это возможно. Известно, что если подбор режима доступно отработать на натурных изделиях экспериментально, то технологам не следует заниматься расчетами. Этот факт вполне оправдан тем, что никакие современные расчеты по достоверности конечных результатов не могут соперничать с реальным опытом. Даже

комбинация только трех переменных: силы тока, времени его действия и программы приложения давления — создает неисчерпаемые режимные варианты. И это не считая операций подготовки деталей под сварку. В современных условиях производства измерять можно только время действия тока. Современные стыковые машины не комплектуются измерителями силы сварочного тока и величины осадочных давлений. Эти сведения о машинах технологи получают из паспортных данных завода-изготовителя. Таким образом, расчеты сварочных токов производятся в редких случаях: только тогда, когда проектируется новая технология и для ее обеспечения по каталогам нужно выбирать подходящие модели стыковых машин. В современных научных публикациях можно найти весьма сложные расчетные формулы для определения температурных полей в свариваемых деталях. Расчеты такого рода, однако, технологи никогда не проделывают. Это объясняется тем, что достоверность подобных расчетов недостаточна. Нормальный расчетный аппарат несмотря на его громоздкость не в состоянии учесть все переменные параметров режима стыковой сварки. Использование ЭВМ оказывается оправданным только в очень редких случаях. Во всех остальных случаях технологи обходятся или простейшими расчетами, или экспериментом. Но расчетные ориентации полезны тем, что они (если только не слишком загромождены неявно видимыми связями) помогают более глубоко воспринимать взаимозависимости хотя бы основных переменных. Такими свойствами в наибольшей мере обладают критериальные методы расчета.

В основу таких расчетов закладывается какой-либо отлично проверенный опыт. Для него определяются необходимые критериальные числа. По этим числам, руководствуясь правилами подобия, находят значения новых переменных для новых, пока не освоенных деталей. В общем виде критерий технологического подобия К был представлен формулой (1.47)

$$\mathrm{K} = \frac{qt}{T_{\text{к}} \sqrt{\lambda \gamma c}\, S \sqrt{t}}. \qquad (3.5)$$

Для стыковой сварки методом сопротивления энергия, выделенная проходящим через стык сварочным током,

$$qt = I^2 (R_{\text{кс}} + R_{\text{м}})\, t. \qquad (3.6)$$

Для стыковой сварки методом оплавления и ударной импульсной

$$qt = U_{\text{оп}} I_{\text{оп}} t. \qquad (3.7)$$

В этих формулах несколько переменных. Главные из них — энергия и время ее действия, т. е. время протекания сварочного тока. Справочная литература изобилует различными эмпирическими формулами, которые подсказывают, какое время включения тока следует выбирать для заданных размеров стержней из разных

металлов. Рекомендации такого рода, разумеется, весьма приближенны. При электрическом, да еще и контактном нагреве любых металлов при разных размерах деталей время включения тока — параметр трудно определимый. Для стыковой сварки в зависимости от целого ряда технологических соображений используют настолько разные мощности, что время включения тока в отдельных случаях будет составлять миллисекунды, а в других — десятки секунд. Рассмотрим причины такого отличия с помощью эксперимента и конкретных расчетных примеров.

Еще в довоенные годы на заводе «Электрик» проводились многочисленные эксперименты по стыковой сварке методом сопротивления стержней разных размеров из разных металлов. Были установлены характерные зависимости необходимого времени включения сварочного тока от его плотности для условий равнопрочности сварных соединений. На основе опытов такого рода еще в 1950-х годах была предложена эмпирическая формула

$$i\sqrt{t} = A \cdot 10^7, \qquad (3.8)$$

где i — в А/м^2; t — в с. Коэффициент A для этой формулы был установлен по данным опытных графиков. Так, в частности, для стальных стержней $A = 8 \div 10$; для алюминиевых $A = 12 \div 20$; для латунных $A = 18 \div 22$; для медных $A = 25 \div 30$.

И сама формула, и ее коэффициенты получили распространение в руководствах по контактной сварке. Действительно, если иметь в виду самое элементарное соответствие между выделяемой током теплотой и теплотой, необходимой для получения сварной точки, то

$$i^2 \rho_{ср} t = \gamma c T. \qquad (3.9)$$

При сварке медных стержней (для $A = 27$ и плотности тока $i = 27$ кА/см^2) из формулы (3.8) получается, что время сварки $t = 1$ с. Если для меди принято среднее значение удельного сопротивления $\rho_{ср} = 6$ мкОм·см, $\gamma c = 4{,}2$ Дж/(см^3·°С), то получим:

$$i^2 \rho_{ср} t = 730 \cdot 6 \cdot 1 = 4380 \text{ МПа}; \quad T = 4380/4{,}2 = 1042 \text{ °С}.$$

Для стальных стержней при $A = 9$ по формуле (3.8) получаем $i = 9000$ А/см^2; $t = 1$ с. Принимая $\rho_{ср} = 80$ мкОм·см, $\gamma c = 5$ Дж/(см^3·°С), из (3.9) получаем $T = 1296$ °С.

В обоих случаях получены температуры, близкие к точке плавления. Стоит обратить внимание при этом на тот факт, что формула (3.8) не принимает в расчет контактные сопротивления. Похоже на то, что это сопротивление не всегда играет главную роль в энергетике свариваемого контакта. Проверим это заключение на конкретных примерах. Для оценки величин холодных стыковых контактов несколько упростим относящуюся к ним расчетную часть, изложенную в п. 1.4.

Если положить приближенно, что полное сопротивление стыкового контакта

$$R_{\text{ко}} \approx r_{\text{гс}}, \tag{3.10}$$

то, учитывая (1.69), (1.70), (1.10) получаем:

$$r_{\text{гс}} = \rho\left[\frac{1}{d} - \frac{1}{D}\right];\ d = D\sqrt{1 - e^{-Z}};\ Z = \frac{4p\theta}{\sigma_{\text{с.д}}\theta_{\text{хол}}}.$$

С учетом выражения (1.6)

$$\sigma_{\text{с.д}} \approx 3\sigma_{\text{т}};$$

для холодного контакта при $\theta = \theta_{\text{хол}}$

$$Z = \frac{4}{3}\frac{p}{\sigma_{\text{т}}}. \tag{3.11}$$

И тогда, раскрывая (3.10), получаем:

$$R_{\text{ко}} \approx r_{\text{гс}} = \rho_0\left[\frac{1}{D\sqrt{1 - e^{-Z}}} - \frac{1}{D}\right].$$

Для холодного контакта, о котором идет речь, следует заметить, что всегда $p \ll \sigma_{\text{т}}$, и соответственно число Z не выходит за пределы единицы. Для такого значения Z оказывается вполне достаточным произвести замену $\sqrt{1 - e^{-Z}} \approx 0{,}85\sqrt{Z}$. Тогда

$$d = 0{,}85D\sqrt{Z} = 0{,}85\sqrt{4/3}\sqrt{p/\sigma_{\text{т}}} \approx D\sqrt{p/\sigma_{\text{т}}}.$$

На основе этих вычислений с достаточной точностью можно определить

$$R_{\text{ко}} = \frac{\rho_0}{D}\left[\sqrt{\sigma_{\text{т}}/p} - 1\right]. \tag{3.12}$$

Эта формула значительно проще, чем формулы п. 1.4, но и менее точна. Тем не менее она показывает, что самыми главными факторами, определяющими сопротивление контакта, являются давление, которое осуществляется при контактировании, и диаметр стержней. Для стержней диаметром 10—25 мм используются сравнительно мягкие режимы нагрева. Если иметь в виду идеализированную подготовку стержней под сварку, то торцевые их поверхности должны быть свободны не только от оксидных пленок, но и других загрязнений. Мало того, для симметричного тепловыделения в контакте торец, по крайней мере, одного стержня должен быть сферическим, большого радиуса кривизны, а второй — плоским или тоже сферическим.

Для таких именно идеализированных условий только и пригодна формула (3.12). Рассчитаем по ней значения сопротивлений: контакта и металла стержней. При этом определим средние значения того и другого за период нагрева: среднее значение сопротивления контакта будет $R_{\text{к.ср}} = R_{\text{ко}}/2$, а металла $R_{\text{м}} =$

$= 2\rho_{ср}l/S$, где l — установочная длина, а $\rho_{ср}$ — среднее значение удельного сопротивления металла (для стали примем $\rho_{ср} = 80$ мкОм·см, $l = D$). Тогда расчеты по всем перечисленным формулам дадут следующие значения сопротивлений (мкОм) при $\sigma = 250$ МПа:

D, мм	p, МПа	$R_{к.\,ср}$	$R_{м.\,ср}$
16	10	31	128
16	30	13	128
25	10	5	81
25	30	1,2	81

Как видно, во всех случаях сварки стержней больших диаметров сопротивление самого металла заметно больше сопротивления контакта.

Совершенно другая картина имеет место при сварке проволоки. Обратимся снова к конкретным числам. Допустим, следует подобрать режим сварки для стальной проволоки диаметром 3 мм. Примем для нее давление $p = 10$ МПа. Тогда по формуле (3.12) сопротивление холодного контакта $R_{к0} = 1192$ мкОм, $R_{к.\,ср} = 596$ мкОм. Среднее значение сопротивления самого металла в данном случае надо считать исходя не из установочной длины, а из объема действительно нагретого металла. Тогда, полагая, что для сварки проволок рационален импульсный режим, положим $t = 0{,}01$ с. В этом случае длина нагретых концов $l = 2\sqrt{at}$ или $l = 2\sqrt{0{,}08 \cdot 0{,}01} = 0{,}056$ см. Соответственно,

$$R_{м.\,ср} = 2 \cdot 80 \cdot 0{,}056/0{,}07 = 128 \text{ мкОм}.$$

Если время сварки увеличить до 0,1 с, то, соответственно, $l = 0{,}17$ см и $R_{м.\,ср} = 404$ мкОм. Как видно, при сварке проволок сопротивление контакта больше сопротивления металла.

Обратимся к критериальной формуле (1.39):

$$T_к = \frac{qt}{4m\sqrt{\lambda\gamma c}\, S\sqrt{t}}. \qquad (3.13)$$

Если иметь в виду при расчете только активное сопротивление свариваемых деталей, то

$$qt = I^2\rho_{ср}2lt/S. \qquad (3.14)$$

Если же учитывать только сопротивление контакта, то согласно (3.12)

$$qt = \frac{I^2\rho_0}{D}\left[\sqrt{\sigma_т/p} - 1\right]t. \qquad (3.15)$$

Если учитывать их вместе, то значения энергий по формулам (3.14) и (3.15) суммируются.

Для конкретных условий сварки прутков и стержней, когда главным является сопротивление самого металла, формула (3.13) приобретает вид

$$T_к = \frac{i^2\rho_{ср}l\sqrt{t}}{2m\sqrt{\lambda\gamma c}}. \qquad (3.16)$$

В условиях производственной практики для стержней малых диаметров, какие свариваются методом сопротивления, режимы сварки обычно не рассчитывают, а подбирают опытным путем. Каталожные данные стыковых машин малых мощностей всегда достаточны для правильного и рационального выбора этих машин.

При сварке же деталей больших сечений, когда приходится ориентироваться на процесс оплавления, без расчетов обходиться трудно. Процесс оплавления вообще совершенно особенный. Его иногда называют взрывоискровым, а иногда и взрыводуговым. Физическая сущность оплавления привлекала к себе внимание большого числа теоретиков и экспериментаторов. Капитальные исследования процесса оплавления проводились и проводятся до сих пор в Институте электросварки имени Е. О. Патона под руководством академиков УССР В. К. Лебедева и С. И. Кучук-Яценко. Книга этих авторов [9] содержит огромный теоретический и экспериментальный материал по стыковой сварке оплавлением.

Большой экспериментальный материал по этому же процессу представлен в книге Н. С. Кабанова и Э. Ш. Слепака [5]. Достаточно ознакомиться с содержанием этих двух книг и можно сделать вывод о существенно большем числе переменных процессов оплавления по сравнению со сваркой методом сопротивления. Мало того, такое определенное понятие, как, например, плотность сварочного тока, для оплавления имеет условный характер. Сам ток определяется интенсивностью оплавления, т. е. частотой отдельных или групповых взрывов перемычек. Отсюда и зависимость скорости оплавления от плотности тока. Если процесс нагрева металла методом сопротивления может происходить при любом вторичном напряжении, то совершенно другая картина наблюдается при сварке оплавлением. Обычно процесс устойчив при некоторых минимальных напряжениях, но существуют и максимальные пределы для напряжения, за которыми взрывоискровой процесс может прямо перейти в непрерывно-дуговой. Устойчивость процесса оплавления определяется не только напряжением холостого хода, но и параметрами сварочного контура, которые и создают ту или иную форму внешней характеристики стыковых машин. Таким образом, и плотности токов, и скорости оплавления связываются с чисто электрическими параметрами источников питания. Недавно Институт электросварки им. Е. О. Патона в процесс оплавления ввел еще одну новую переменную: вращение одной из оплавляемых деталей. Это, по-видимому, откроет совершенно новые возможности как ведения самого процесса оплавления, так и его окончания посредством осадки одновременно и осевой, и поворотной. Все перечисленные сложности расчетных оценок основных переменных процесса оплавления все же позволяют сделать и некоторые общие выводы, основываясь на критериальной формуле (3.13).

Энергия при процессе оплавления, которую получают стержни, определится так (см. рис. 3.8):

$$qt = U_{оп} I_{оп} t_{оп} - \gamma c S T_{вз} h, \tag{3.17}$$

где $U_{оп}$ — среднее значение напряжения, при котором идет процесс оплавления; $I_{оп}$ — среднее значение тока оплавления; $t_{оп}$ — время непрерывного оплавления; $T_{вз}$ — средняя температура взорванного и выброшенного металла; h — общая длина оплавленных участков стержней,

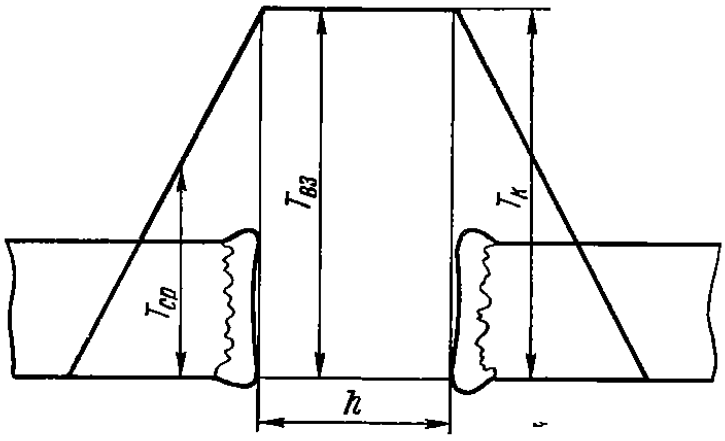


Рис. 3.8. Схематическое распределение температур в зоне стыковой сварки оплавлением

$$h = vt_{оп}, \tag{3.18}$$

которая определяется средней скоростью v и временем оплавления.

При нагреве деталей при сварке методом сопротивления нас интересовала температура в плоскости контакта, которая, согласно (1.38), определяется так:

$$T_{ср} = mT_к.$$

Но известно, что на оплавляемых торцах температуру $T_к$ в конце нагрева доводим до точки кипения металла и практически можем считать $T_к = T_{вз} = T_{кип}$. Следовательно, формула (3.13) с учетом формул (3.17) и (3.18) получается такой:

$$T_{ср} = \frac{(U_{оп} I_{оп} - \gamma c S T_{вз} v)\, t_{оп}}{4\sqrt{\lambda\gamma c}\, S \sqrt{t_{оп}}} = \frac{(U_{оп} i_{оп} - \gamma c T_{кип} v)\sqrt{t_{оп}}}{4\sqrt{\lambda\gamma c}}, \tag{3.19}$$

где $i_{оп}$ — средняя плотность тока оплавления.

Для расчетов температуру $T_{ср}$ можно считать так: $T_{ср} = T_{кип}/2$.

Теоретическая формула (3.19) содержит необходимые для расчета физические константы и несколько переменных параметров режима оплавления. Хотя формула ничего не говорит об ограничениях, но они в реальной действительности безусловно есть. Так, в частности, не зафиксированы скорости оплавления более 0,6 см/с, а плотности тока выше 2500 А/см^2. Однако существующие пока рекомендуемые диапазоны плотности тока, мощности и других параметров могут быть и расширены. Развитие всякой технологии, в том числе сварочной, всегда характеризуется тем, что привычные ограничения устраняются благодаря новым теоретическим и экспериментальным открытиям.

До семидесятых годов почти все исследователи-сварщики считали, что процесс оплавления полностью изучен и исчерпан. В связи с этим стыковые машины строились только как универсальные,

пригодные для любого ассортимента свариваемых деталей. Трансформаторы машин, с их конструкцией вторичного контура и железных масс, замеряли в стабильных формах и размерах. Никто и не помышлял о том, что, например, для стыковых машин могли быть созданы вторичные контуры с полным сопротивлением короткого замыкания менее 150 мкОм. Но вот созданы новые типы сварочных трансформаторов кольцевого типа, полное сопротивление которых оказалось сниженным до 15 мкОм, т. е. в десять раз против нормально принятых броневых конструкций [9, 15]. Эффект резкого снижения полного сопротивления всего сварочного контура определяется тем, что вторичная обмотка состоит из нескольких, например десятка отдельных витков, насаженных на общий кольцевой сердечник. Расстояние между витками таково, чтобы магнитные поля каждого витка не сливались в общий поток. Тогда все витки работают как отдельные самостоятельные трансформаторы, токи которых суммируются на общую для них нагрузку. Малые сопротивления сварочных контуров позволили подводить к оплавляемым торцам огромные мощности при тех же самых вторичных напряжениях 5—8 В.

Кольцевые трансформаторы ИЭС имени Е. О. Патона позволили создать уникальные машины для стыковой сварки магистральных труб диаметром 1420 мм с толщиной стенок до 22 мм.

Рассмотрим основные расчетные и экспериментальные показатели по режимам сварки таких уникальных объектов. Прежде всего найдем общие для всех случаев очевидные равенства:

$$\left.\begin{aligned} U_{оп} &= I_{оп}R_{оп}; \\ U_2 &= I_{оп}\sqrt{(R_{оп}+r_{тр})^2+x_{тр}^2}, \end{aligned}\right\} \qquad (3.20)$$

где $U_{оп}$ и $I_{оп}$ — напряжение и ток установившегося интенсивного процесса оплавления, какой именно обеспечивается и наблюдается перед операцией осадки; $R_{оп}$ — сопротивление искрового промежутка для конца процесса оплавления; $r_{тр}$ и $x_{тр}$ — соответственно активное и индуктивное сопротивления вторичных контуров любых, в том числе и кольцевых трансформаторов. Эти сопротивления (и особенно $x_{тр}$) меняются в зависимости от силы тока во вторичном контуре. Значения $r_{тр}$ и $x_{тр}$ не равны тем $r_к$ и $x_к$, которые определяют для короткого замыкания. Вести какие-либо расчеты с учетом переменности $r_{тр}$ и $x_{тр}$ в зависимости от силы вторичного тока — задача вполне возможная, но теоретические формулы получаются очень громоздкими. По этой причине вместо $r_{тр}$ и $x_{тр}$ принято оперировать величинами $r_к$ и $x_к$ и тогда вторую формулу из (3.20) можно переписать:

$$U_2 = I_{оп}\sqrt{(R_{оп}+r_к)^2+x_к^2}. \qquad (3.21)$$

В этом равенстве переходное сопротивление от зажимных губок к свариваемым деталям (в том числе и трубам) не учитывается

в предположении хорошей зачистки контактируемых элементов, т. е. и губок, и деталей.

Из равенств (3.20) и (3.21) получаем:

$$\left.\begin{aligned}\frac{U_{оп}}{U_2}=\frac{R_{оп}}{\sqrt{(R_{оп}+r_к)^2+x_к^2}}=\frac{1}{\sqrt{1+2r_к/R_{оп}+Z_к^2/R_{оп}^2}};\\ U_{оп}=\frac{U_2}{\sqrt{1+2r_к/R_{оп}+Z_к^2/R_{оп}^2}}.\end{aligned}\right\}\quad(3.22)$$

Напишем уравнение внешней характеристики контактного трансформатора. Здесь и далее, поскольку речь идет о процессах оплавления, напряжение на свариваемых деталях, т. е. на нагрузке, будем обозначать $U_{оп}$:

$$U_{оп}=U_2-I_{оп}Z_2;\ Z_2=r_2\cos\varphi;\ r_2=R_{оп}+r_{тр};$$
$$U_{оп}=U_2-I_{оп}/(R_{оп}+r_{тр})/\cos\varphi.$$

При коротком замыкании $U_{оп}=0$; $R_{оп}=0$; $r_{тр}=r_к$; $\cos\varphi=\cos\varphi_к$; $I_{оп}=I_{к.з}$, откуда

$$\cos\varphi_к=I_{к.з}r_к/U_2.$$

Относительно стыковых машин обычно бывают известны характеристики по ступеням включения и, следовательно, значения $I_{к.з}$, U_2, $Z_к$. И все же этих данных для полных расчетов бывает недостаточно, если приходится адресоваться к формуле (3.22).

Внешнюю характеристику иногда можно представить в виде степенной зависимости

$$U_{оп}=U_2(1-I_{оп}/I_{к.з})^p.\quad(3.23)$$

Для токов, меньших половины тока короткого замыкания, показатель p можно принимать равным 0,5. Расхождение формулы (3.23) с реальной внешней характеристикой при таком показателе обычно не выходит за пределы ∓ 5 %.

Показатели режима оплавления, такие, например, как установившаяся скорость оплавления, зависят от внешних характеристик трансформатора. Для установившегося интенсивного процесса оплавления вторым членом равенства (2.56) можно пренебречь, и тогда наибольшая скорость оплавления перед осадкой будет определяться так:

$$v=\frac{U_{оп}I_{оп}}{\gamma cT_{вз}S}=\frac{U_{оп}i_{оп}}{\gamma cT_{вз}}.\quad(3.24)$$

Сопротивление искрового промежутка к моменту осадки

$$R_{оп}=\gamma cT_{вз}Sv/I_{оп}^2.\quad(3.25)$$

Приведенные формулы (3.22)—(3.25) содержат пять неизвестных: $U_{оп}$, $I_{оп}$, v, $R_{оп}$, p. Таким образом, расчеты могут быть произведены хотя бы при одной заданной или выбранной переменной.

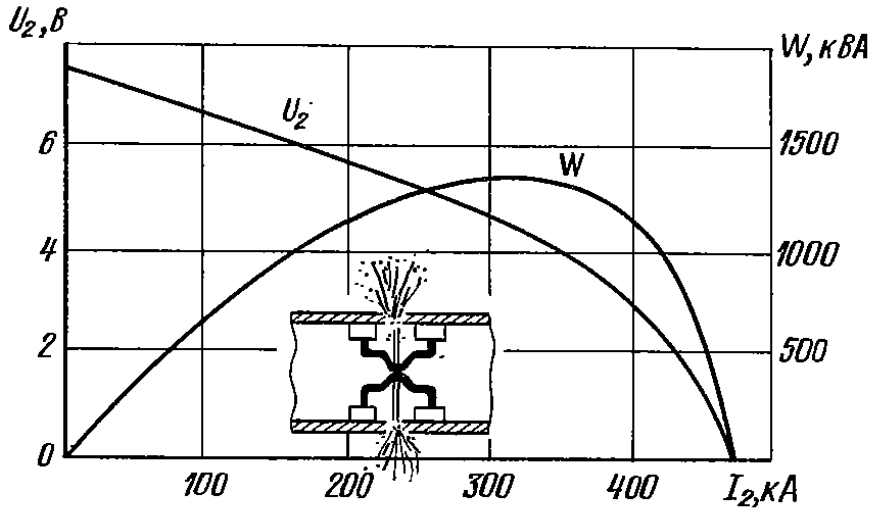


Рис. 3.9. Внешняя характеристика и мощность вторичной цепи кольцевого трансформатора типа К-700

Для того чтобы убедиться в некоторой затруднительности и непроизводительности выбора, покажем современные пределы основных параметров режима сварки непрерывным оплавлением (численные значения относятся к установившемуся интенсивному конечному периоду оплавления): $v = 0{,}05 \div 0{,}6$ см/с (изменяется в 12 раз); $U_{оп} = 3{,}5 \div 7$ В (изменяется в 2 раза); $i_{оп} = 150 \div 2500$ А/см^2 (изменяется в 17 раз).

Таким образом, для развитых сечений характерны высокие скорости оплавления, но соответственно и бо́льшие плотности тока. Поскольку напряжение $U_{оп}$ меняется в относительно небольших пределах, то удельные мощности, согласно формуле (3.24), требуются значительными для больших скоростей.

Определение мощностей для оплавления $U_{оп}I_{оп}/S$, токов оплавления и напряжений $U_{оп}$ возможно при помощи известной внешней характеристики машины, которую заводы-изготовители вводят в настоящее время в паспортные данные машины.

На рис. 3.9 построена внешняя характеристика стыковой машины большой мощности, кольцевой трансформатор которой (тип К-700) обладает следующими параметрами: $U_2 = 7{,}4$ В, $Z_к = 15{,}6$ мкОм, $x_к = 10{,}8$ мкОм, $r_к = 11{,}3$ мкОм.

Сила тока короткого замыкания $I_{к.з} = 474$ кА. Этот кольцевой трансформатор встроен в стыковую машину установки «Север», предназначенной для сварки магистральных труб диаметром 1420 мм, толщиной стенки от 15,7 до 22 мм. По внешней характеристике на рис. 3.9 построена кривая мощности. Измерения показали, что сила тока оплавления для разной толщины стенок трубы в среднем составляет 110 кА. По кривой мощности для этого тока $W = 713$ кВт. Площадь поперечного сечения труб $S = 700 \div 980$ см^2. Принимая среднее $S = 840$ см^2, получаем удельную мощность 8200 кВт/м^2. Измерения давали значения от 7000 до 10 000 кВт/м^2. По внешней характеристике машины $U_{оп} = 6{,}485$ В. Вычислим по формуле (3.25) значение $R_{оп}$, полагая, что $\gamma c T_{вз} = 12{,}5$ кДж/см^3 (для конструкционных сталей можно

считать $\gamma c = 5$ Дж/(см^3·°С) и $T_{вз}$ равной точке кипения $T_{вк} = 2500$ °С). При этих данных по формулам (3.24) и (3.25)

$$v = \frac{713 \cdot 10^3}{12{,}5 \cdot 10^3 \cdot 840} = 0{,}068 \text{ см/с}; \quad R_{оп} = \frac{12{,}5 \cdot 840 \cdot 0{,}068}{(110)^2} = 59 \text{ мкОм}.$$

Проверим, насколько формулы (3.24) и (3.25) дают ошибки при сравнении показателей внешней характеристики с опытными измерениями. Напряжение на оплавляемых концах

$$U_{оп} = I_{оп} R_{оп} = 110 \cdot 10^3 \cdot 59 \cdot 10^{-6} = 6{,}49 \text{ В},$$

т. е. оно почти не отличается от показателя внешней характеристики. Следовательно, формула (3.25) для вычисления $R_{оп}$ вполне достоверна. Достоверно также принятое равенство $\gamma c T_{вз} = 12{,}5$ кДж/см^3.

Теперь вычислим $U_{оп}$ по формуле (3.22):

$$U_{оп} = \frac{7{,}4}{1 + 2 \cdot 11{,}3/59 + 15{,}6^2/59^2} = \frac{7{,}4}{1 + 0{,}383 + 0{,}07} = 6{,}14 \text{ В}.$$

Расхождение по сравнению с внешней характеристикой в 5,3 %, т. е. вполне допустимое.

Следует обратить внимание на два обстоятельства.

1. В формуле (3.22) третье слагаемое в подкоренной сумме без большой ошибки может быть опущено. Тогда формула (3.22) примет вид

$$U_{оп} \approx \frac{U_2}{1 + r_к/R_{оп}}. \qquad (3.26)$$

2. Внешняя характеристика трансформатора К-700, особенно в области токов до 3/4 $I_{к.\,з}$, точно описывается формулой

$$U_{оп} = U_2 (1 - I_{оп}/I_{к.\,з})^{1/2}. \qquad (3.27)$$

Стоит проверить сделанные выше допущения на машине с обычным броневым трансформатором при сварке обычных деталей. Рассмотрим в связи с этим случай сварки непрерывным оплавлением полос шириной 300 мм и толщиной 4 мм. Внешние характеристики стыковой машины типа МС-1601 для токов менее $I_{к.\,з}/2$ тоже хорошо описываются формулой (3.27). Основные характеристики машины для максимальной ступени включения (рис. 3.10) следующие: $U_2 = 7{,}7$ В; $I_{к.\,з} = 58$ кА; $Z_к = 133$ мкОм; $\cos\varphi = 0{,}45$; $x_к = 118$ мкОм; $r_к = 60$ мкОм.

Выше было показано, что скорость оплавления в зависимости от мощности для различных форм свариваемых сечений может меняться от минимума до максимума в 12 раз. Более соблазнительно задаваться величиной $U_{оп}$, которая меняется меньше, выбирая тем самым наиболее подходящую внешнюю характеристику. Для ориентации при таком выборе на рис. 3.11 построили номограмму на основе формулы (3.24) и многочисленных опытных данных Института электросварки им. Е. О. Патона, ЦНИИТмаша и завода «Электрик».

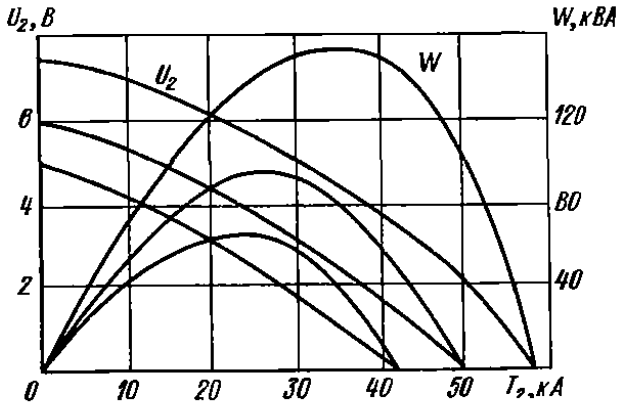


Рис. 3.10. Внешние характеристики и мощности вторичной цепи трансформатора типа МС-1601

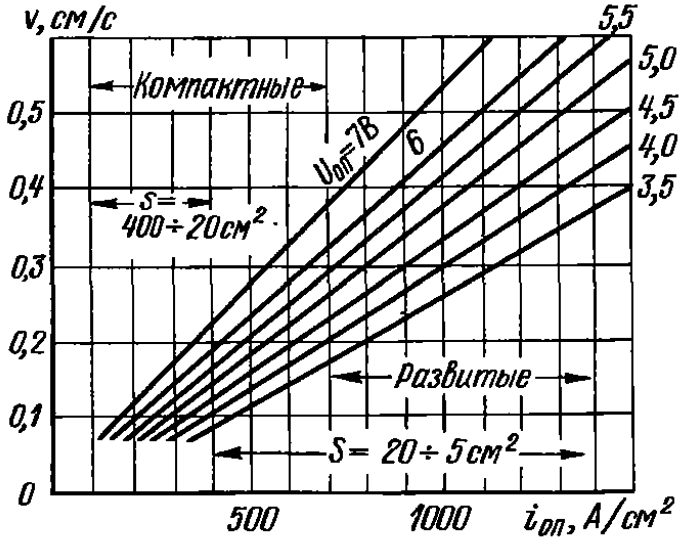


Рис. 3.11. Номограмма зависимости скорости оплавления от плотности тока оплавления при разных напряжениях на оплавляемых деталях компактного и развитого сечения

Применяя для сварки полос специализированную стыковую машину типа МС-1601 завода «Электрик», по ее паспортным данным зададимся максимальной возможной скоростью оплавления: $v = 0{,}4$ см/с. Тогда по номограмме

$$i_{оп} = 1 \text{ кА/см}^2; \quad I_{оп} = 1 \cdot 12 = 12 \text{ кА}.$$

Номограмма ориентирует на $U_{оп} = 5 \div 5{,}5$ В. Это значит, что придется использовать внешнюю характеристику не самой высшей ступени, а с напряжением холостого хода $U_2 = 6$ В. По ней (см. рис. 3.10) при $I_{оп} = 12$ кА, $U_{оп} = 5{,}2$ В, токе короткого замыкания $I_{к.э} = 50$ кА

$$Z_к = 6/50 = 120 \text{ мкОм}.$$

При $\cos \varphi_к = 0{,}45$

$$r_к = 120 \cdot 0{,}45 = 54 \text{ мкОм}.$$

По формуле (3.24)

$$U_{оп} = \frac{12{,}5 \cdot 12 \cdot 0{,}4}{12} = 5 \text{ В}.$$

Расхождение с внешней характеристикой несущественное. Сопротивление искрового промежутка по формуле (3.25):

$$R_{оп} = 12{,}5 \cdot 12 \cdot 0{,}4/144 = 416 \text{ мкОм}.$$

По формуле (3.22)

$$U_{оп} = \frac{6}{1 + 2 \cdot 54/416 + 120^2/416^2} = 5{,}17 \text{ В}.$$

По приближенной формуле (3.26)

$$U_{оп} = \frac{6}{1 + 54/416} = 5{,}3 \text{ В}.$$

Это тоже близко к тому, что дает внешняя характеристика.

После того как получены все электрические параметры оплавления, необходимо произвести тепловой расчет. Он должен убедить технолога, что рассчитанный режим обеспечит нагрев деталей, достаточный для выбранного осадочного давления.

Осадка — сжатие нагретых деталей — является главной операцией, обеспечивающей качество сварного соединения. Достаточность осадочной деформации можно определять, в известной мере, по внешнему виду сваренного стыка. Для любых деталей на некотором расстоянии от плоскости контакта деформация будет нулевой, обозначим ее как $x_{од}$. Это значит, что давление не превышало, а было равно пределу текучести металла в этой плоскости, нагретого до некоторой температуры [см. формулу (2.58)]

$$\sigma_т = \sigma_{т0} (1 - T_{од}/T_{пл})^2, \qquad (3.28)$$

где $\sigma_{т0}$ — предел текучести холодного металла; $T_{од}$ — температура в зоне нулевой деформации в момент осадки; $T_{пл}$ — температура плавления металла.

Осадочное давление p должно быть равно $\sigma_т$ при температуре $T_{од}$.

Многолетний опыт показал, что первым (но не единственным!) признаком достаточности осадочного давления для деталей, сваренных оплавлением, является получение на готовых деталях такой формы стыка, чтобы получалось:

$$x_{од} = 1 + 0{,}2d; \quad x_{од} = 1 + 0{,}2\delta, \qquad (3.29); (3.30)$$

где d — диаметр или сторона квадрата сечения детали; δ — толщина полосы и прямоугольника. Первое равенство, как видно, характерно для компактных сечений, второе — для развитых. Все размеры в формуле даны в миллиметрах.

Расстояние $x_{од}$ — это деформированный размер. Расстояние x от плоскости торца до той же зоны нулевой деформации может быть определено из одинаковых объемов: нагретого цилиндра (рис. 3.12) и деформированного конуса:

$$\frac{\pi d^2}{4} x = \frac{\pi}{3} x_{од} \left(\frac{D^2}{4} + \frac{Dd}{4} + \frac{d^2}{4} \right);$$

$$x = \frac{x_{од}}{3} \left(\frac{D^2}{d^2} + \frac{D}{d} + 1 \right).$$

Приближенно

$$D \approx d \sqrt{1 + \varepsilon/(100 - \varepsilon)}, \qquad (3.31)$$

где ε — относительная деформация, %.

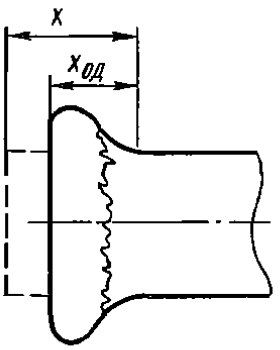


Рис. 3.12. Модель деформации нагретой детали при ее осадке

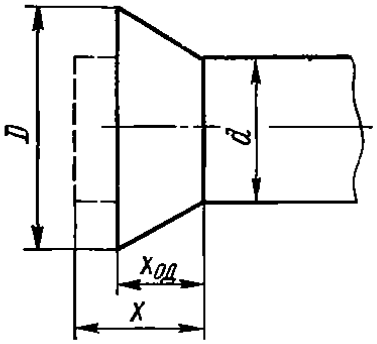
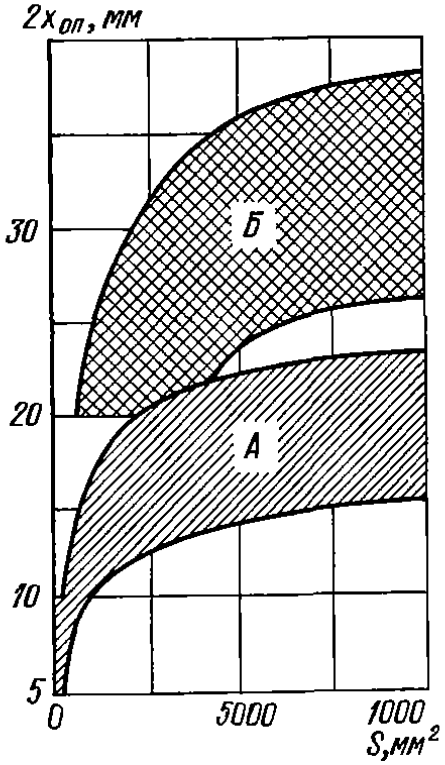


Рис. 3.13. Рекомендуемые современной практикой припуски на оплавление в зависимости от формы сечения свариваемых деталей и площади сечения; область *А* — стыковая сварка листов толщиной 1—25 мм, область *Б* — для компактных сечений большой площади



Практически наибольшее (и достаточное) обжатие получается при $\varepsilon = 50\ \%$. Тогда

$$x = 1{,}5d. \tag{3.32}$$

Для данного случая сварки полос толщиной $\delta = 4$ мм

$$x = 1{,}5x_{од} = 1{,}5\ (1 + 0{,}2 \cdot 4) = 2{,}7 \text{ мм}.$$

Примем осадочное давление $p = 60$ МПа. Необходимая общая сила осадки $P = 72$ кН. Машина МС-1601 обеспечивает предельную силу осадки 125 кН. Согласно формуле (3.28), температура $T_{од}$ должна быть при $\sigma_{т0} = 250$ МПа равной 725 °С.

Распределение температуры в свариваемых деталях в зависимости от расстояния от плоскости кипящего металла

$$T_{(x,\,t)} = T_{вз}\Phi\ (\xi)\ e^{-vx/(2a)}. \tag{3.33}$$

В этой формуле Н. Н. Рыкалина $T_{вз}$ — температура на оплавляемом торце, которую, как показала расчетная практика, надо принимать равной точке кипения металла; $\Phi\ (\xi)$ — одна из функций распределения, показанная на рис. 1.17.

Вычисляем составляющие формулы (3.33):

$$T_{(x,\,t)}/T_{вз} = 725/2500 = 0{,}29;$$

$$vx/(2a) = 0{,}4 \cdot 0{,}27/(2 \cdot 0{,}08) = 0{,}675.$$

Таким образом, $\Phi\ (\xi) = 0{,}57$; $\xi = \dfrac{x}{2\sqrt{at}} = 0{,}28$; и, значит, характерное время $t \approx 3$ с.

При скорости $v = 0{,}4$ см/с за это время будет оплавлено $2x_{оп} = vt = 0{,}4 \cdot 3 = 1{,}2$ см.

На рис. 3.13 графически представлены границы рекомендуемых практикой размеров оплавленного (по сути — сожженного) ме-

талла. Как видно, для данного случая размер $2x_{оп} = 12$ мм не велик и допустим при выборе режима сварки. Общий вывод всего расчета такой: режим оплавления и ступень включения машины подобраны правильно.

Рассмотрим теперь случай сварки деталей той же самой площади сечения ($S = 1200$ мм^2), но компактной формы с размерами 30×40 мм. В области компактных сечений номограмма, приведенная на рис. 3.11, даст следующую ориентировку: $i_{оп} = 400$ А/см^2; $v = 0{,}15$ см/с; $U_{оп} = 5$ В. Если нет внешних характеристик, то расчет приходится вести по этим исходным данным. Так, по формуле (3.25) можно определить $R_{оп}$. Но и только. Дальше неизвестны ни $r_к$, ни $Z_к$, ни $I_{к.з}$. Что-то надо и еще назначать предположительно. Наименее ошибочно принять напряжение $U_{оп}$, которое дает номограмма для выбранных v и $i_{оп}$, на 10—15 % меньшим, чем напряжение холостого хода машины, т. е. прямо задаться поиском нужной внешней характеристики. Соответственно могут измениться v и $i_{оп}$. Допустим, что в данном случае мы будем использовать тот же трансформатор, с тем же контуром, что и в машине МС-1601, но только зажимные устройства приспособим для компактного сечения. Тогда в группе внешних характеристик (см. рис. 3.10) находят одну с $U_2 = 5$ В и $I_{кз} = 42$ кА. Здесь $Z_к$ имеет то же значение (120 мкОм), что и в расчете для развитого сечения. По этой внешней характеристике находим:

$$I_{оп} = 5 \text{ кА}; \; i_{оп} = 417 \text{ А/см}^2; \; v = 24/(12{,}5 \cdot 12) = 0{,}16 \text{ см/с};$$

$$\cos \varphi_к = 0{,}45; \; r_к = 54 \text{ мкОм}.$$

Сопротивление искрового промежутка будет уже другим:

$$R_{оп} = 12{,}5 \cdot 12 \cdot 0{,}16/5^2 = 960 \text{ мкОм}; \; U_{оп} = \frac{5}{1 + 54/960} = 4{,}73 \text{ В}.$$

Теперь надо проанализировать тепловую картину. При том же значении осадочного давления температура на расстоянии x должна быть такой же, как и в свариваемых полосах, но уже при $x = 1{,}5\,(1 + 0{,}2 \cdot 30) = 10{,}5$ мм. Такое температурное состояние достижимо только при очень длительном оплавлении. Для деталей такого рода неизбежно применение технологии с предварительным подогревом. Он окажется необходимым, если даже мы снизим значение скорости, перейдя на еще более низкую внешнюю характеристику. Приведенные расчетные примеры показывают существенную технологическую разницу сварки оплавлением деталей с развитым или компактным сечением. Расчеты определяют конструкцию выбираемой машины, но не всегда точно определяют такие именно оптимальные режимы, при которых обеспечивается высшее качество сварного соединения. В реальных условиях опытная проверка может внести в эти расчетные показатели некоторые коррективы. Приведенные выше расчеты не могут определять структурные картины сварных соединений — это определяется опытом.

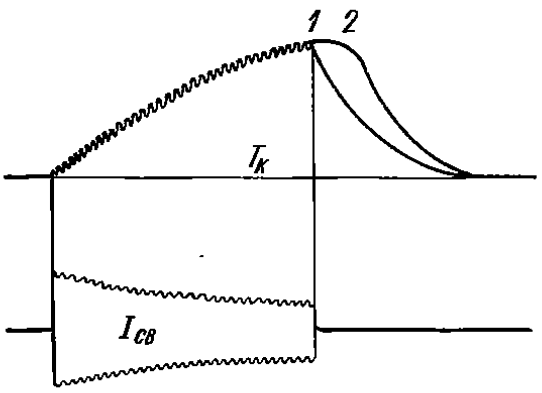


Рис. 3.14. Осциллограмма сварочного тока и температуры в свариваемом контакте при стыковой сварке стальных стержней методом сопротивления

В современном производстве значимость технологических расчетов особенно высока, когда проектируются и создаются гибкие автоматизированные производства (ГАП). Для них оказываются необходимыми не универсальные машины с их большим запасом регулирования (иногда 16 ступеней) и неиспользуемым запасом активных материалов в трансформаторах. Для ГАП должны создаваться (и создаются уже) четко специализированные машины, у которых и электрическая, и механическая системы должны рассчитываться без неоправданных запасов электрических и механических мощностей.

Вернемся еще раз к вопросу особой роли механической энергии в процессах стыковой сварки. К сожалению, до сих пор этому технологическому параметру в технологических документах и проектных материалах не уделяется того внимания, какого заслуживает механическая энергия в качестве осадочного давления. Все существующие технологические инструкции на предприятиях и в литературных источниках дают рекомендации осадочных давлений без учета скорости их приложения. Изучая осциллограммы стыковой сварки стальных стержней при осадочных давлениях приблизительно в 30 и 80 МПа, обратим внимание не только на различную скорость осадки, но самое существенное — на осциллограмму температуры, которая измерялась в плоскости контакта. Оказалось (рис. 3.14), что при малых давлениях и при сравнительно медленной осадке с момента выключения тока (рис. 3.14, точка *1*) контакт без промедления начинает охлаждаться. Этот момент четко фиксировался по той причине, что в проводах термопары, пока был включен сварочный ток, индуктировался переменный ток, который не удавалось полностью подавлять фильтрующей схемой. Но как только процесс сжатия был ускорен за счет повышенного давления, на кривой температуры появился участок *1—2* явного продолжения нагрева после выключения тока. Увеличенная скорость осадки создает дополнительный импульс температуры.

Современные стыковые контактные машины неспособны обеспечивать скорости осадки больше 3—4 см/с. Бóльшие ударные скорости осадки получаются только при сварке на микросварочных конденсаторных ударных машинах. Для стыковых машин больших мощностей вполне рациональными окажутся сдвиго-поворотные деформации, но машин такого рода пока не существует. Нет сомнения в том, что такие машины появятся, когда некоторые сплавы потребуют от технологов минимально возможных объемов нагретого металла вокруг плоскости свариваемого контакта.

Приведенные расчеты дают основание сформулировать некоторые общие принципы для процессов сварки давлением.

1. Сварка давлением может осуществляться при любых сочетаниях и комбинациях энергии тепловой и механической. Суммарная энергия по плоскости свариваемого контакта может регулироваться от энергии плавления до энергии связи.

2. Самым существенным является то, что оба вида энергии при этом должны дозироваться динамически, с различными регулируемыми скоростями ввода энергии и прекращения ее действия в необходимый момент.

3. Наименьшей инерционностью воздействия на контактную плоскость обладает механическая энергия. В связи с этим следует обратить особое внимание технологов на широчайшие возможности программирования этой энергии.

4. Все существующие литературные рекомендации по использованию статических или медленно действующих осадочных давлений следует рассматривать только как ориентиры частных и далеко не всегда оптимальных режимов сварки.

5. Каждый новый технический эффект, качественный или количественный, достигается только с помощью новых технических средств, т. е. введением в старую технологию новой переменной. Механическая энергия с ее неограниченными возможностями программирования и есть эта новая переменная. К этой переменной и должно быть обращено внимание технологов сварки и проектировщиков контактных машин.

3.4. Технологические циклы стыковой сварки

Технологическим циклом электрической контактной стыковой сварки следует, вероятно, называть сумму однообразно повторяющихся операций, в результате свершения которых получаем стыковое сварное соединение заданного качества.

Возможные подготовительные операции с заготовками частично были рассмотрены в тексте, относящемся к рис. 3.2 и 3.3.

Первой и основной операцией, таким образом, является нагрев. Этот процесс весьма разнообразен. Если речь идет о сварке методом сопротивления, то он может быть непрерывным (рис. 3.15, *а*) или прерывистым (рис. 3.15, *б*). Используется и комбинация (рис. 3.15, *в*) обоих процессов. Непрерывный нагрев особенно характерен для проволоки и прутков малого диаметра — около 2—8 мм.

Для круглых стержней большего диаметра рационально использовать или прерывистый, или комбинированный подогрев. Операция подогрева вообще может одновременно решать три задачи: 1) создать равномерный нагрев по всей плоскости контакта; 2) обеспечить относительно малую скорость подъема температуры для высоколегированных сталей, не выносящих слишком быстрого нагрева; 3) подготовить к окончательному сварочному

нагреву контакт и его зону для заготовок легированной закаливающейся стали.

Для компактных сечений операция подогрева почти всегда предшествует процессу оплавления. Чаще всего, однако, после каждого импульса подогрева контакт разрывают, а затем детали вновь объединяют для следующего импульса подогрева. Такой прерывистый подогрев используют для сварки больших компактных сечений, например, стержней железобетонной арматуры. При использовании заготовок такого рода никогда не заботятся о форме свариваемых концов. После грубой механической обрубки, а также газовой или дуговой резки они принимают самую произвольную форму.

Прерывистый подогрев с разрывами контакта обеспечивает выравнивание всех неровностей концов. После многократных такого рода замыканий и размыканий под током детали не только создают плоский контакт, но и должным образом подогреваются до температуры $T_{пд}$ для перехода на непрерывный процесс оплавления деталей.

Подготовительные операции подогрева можно рассматривать и с помощью все той же критериальной формулы (3.5), и формулы (3.13). Согласно ранее данным разъяснениям, числитель в критерии К [см. формулу (3.5)] — это энергия, которую мы вводим в металл. Знаменатель — это тепловая энергия, отводимая теплопроводностью в глубину стержней. При прерывистом подогреве перед оплавлением обычно ведут нагрев при том же вторичном напряжении, от которого оплавление будет возбуждено после подогрева. Следовательно, процесс все время идет на одной и той же внешней характеристике. Такой именно случай и рассмотрим как типовой. На рис. 3.16 представлены две кривые: непрерывного нагрева стержней (H) силой тока I и непрерывного охлаждения тех же стержней (Ox). Первый импульс подогрева создает подъем температуры по участку кривой *0—1*. В этот момент ток выключается или разрывается контакт. Стержни охлаждаются по участку кривой *1—2*, в точности параллельному такому же участку *1—2* на кривой Ox для такой же температуры. Второй импульс нагрева пойдет по части кривой *2—3*, в точности параллельной такому же температурному участку *2—3* на кривой непрерывного нагрева. Затем все повторяется многократно, но так, что и нагревы, и охлаждения за каждый импульс будут осуществляться по закону кривых H и Ox.

Соответственно, средняя температура подогрева $T_{пд}$ будет меньше той средней $T_{ср}$, какая получилась бы от непрерывно действующего тока. Все зависит от соотношения $t_н$ и t_{ox} (рис. 3.16) и от числа n этих прерывистых включений.

Обращаясь теперь к формулам (3.5) и (3.13), для цикла подогрева можем написать

$$qt = qnt_н. \qquad (3.34)$$

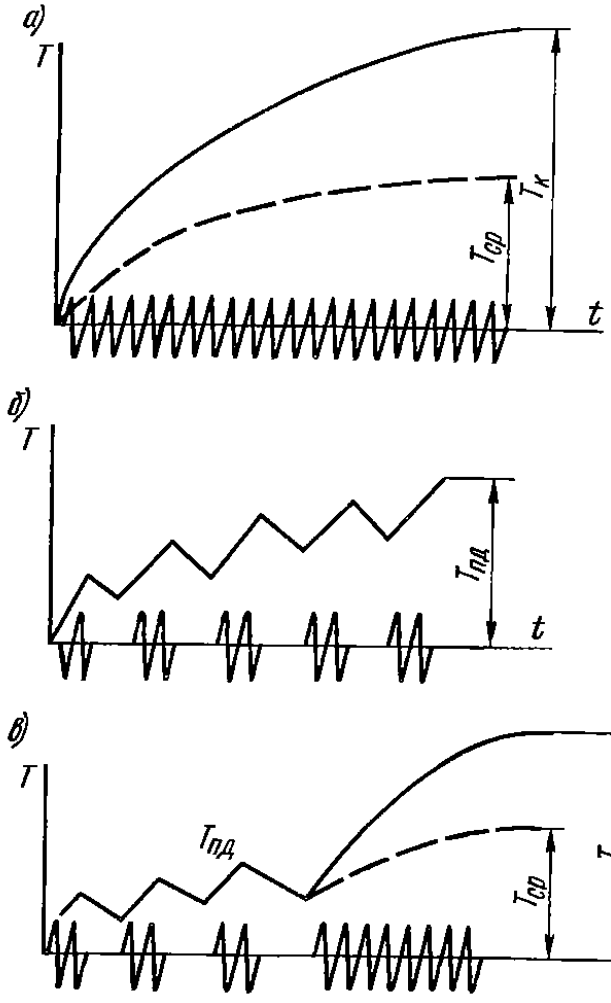
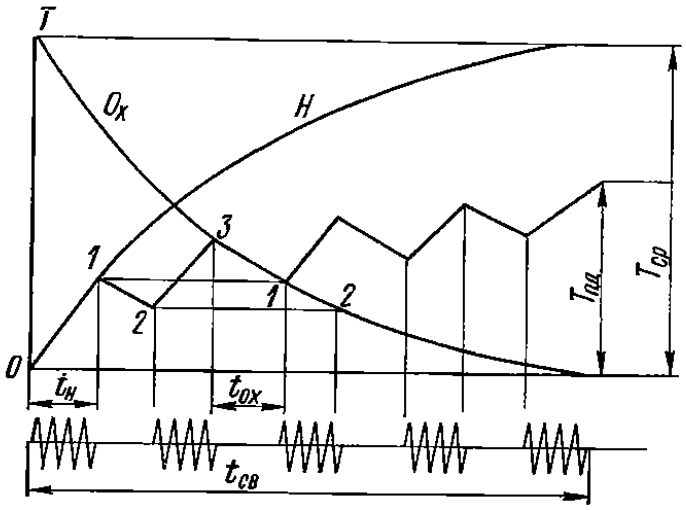


Рис. 3.15. Температурные кривые нагрева стержней методом сопротивления

Рис. 3.16. Времеиные зависимости параметров процесса нагрева деталей методом прерывистого оплавления



В результате формула (3.13) примет вид

$$T_{пд} = \frac{qnt_н}{4\sqrt{\lambda\gamma c}\,S\sqrt{n\,(t_н + t_{ох})}} = \frac{q\sqrt{n}\,t_н}{4\sqrt{\lambda\gamma c}\,S\sqrt{t_н + t_{ох}}}. \quad (3.35)$$

Положим: $t_н = \alpha t_{св}$, где $\alpha \ll 1$; $t_{ох} = \beta t_н$; $t_{ох} = \alpha\beta t_{св}$. Здесь $t_{св}$ (см. рис. 3.16) — время нагрева, при котором зона контакта стержней этим же током нагреется до $T_{ср}$, достаточной для сваривания. Число β может быть любым, но не слишком сильно отличающим $t_{ох}$ от $t_н$. Для такого рода соотношений формула (3.35) примет вид:

$$T_{пд} = \frac{q\sqrt{n\alpha t_{св}}}{4\sqrt{\lambda\gamma c}\,S\sqrt{1+\beta}}. \quad (3.36)$$

Здесь мощность q может определяться как угодно точно с учетом того, что она равна

$$q = I^2\,(R_{к.\,ср} + R_{м.\,ср}),$$

где $R_{к.\,ср}$ и $R_{м.\,ср}$ — среднее значения сопротивлений контакта и свариваемых деталей.

При $n = 1$; $\alpha = 1$; $\beta = 0$ формула (3.36) превращается в формулу непрерывного нагрева

$$T_{ср} = \frac{q\sqrt{t_{св}}}{4\sqrt{\lambda\gamma c}\,S}. \quad (3.37)$$

При выполнении операций подогрева для сварки больших сечений иногда приходится обеспечивать от нескольких включений до десятков. Допустим, для примера, что число $\beta = 1$, т. е. $t_н = t_{ox}$, и что время $t_н$ составляет 0,1 от времени $t_{св}$, т. е. $\alpha = 0{,}1$. Тогда согласно формуле (3.36), желая создать температуру подогрева $T_{пд} = T_{ср}$, получим

$$\frac{\sqrt{n\alpha}}{\sqrt{1+\beta}} = \frac{\sqrt{0{,}1n}}{\sqrt{1+1}} = 1.$$

Отсюда $n = 20$ включений. Разумеется, в условиях грубой практики, например в цехах домостроительных комбинатов, на стройках гидростанций, никто таких расчетов не делает. Число включений n и время $t_н$ и t_{ox} подбирают опытным путем. Если же речь идет о сварке легированных закаливающихся сталей, то расчеты подогревов производить надо и затем согласовывать их, уже уточненно, с металлографическими структурами готовых сварных соединений.

Для сварных соединений из сталей, не терпящих существования в зоне контакта любых резко контрастных структур, после сварки осуществляют термическую обработку. Для инструментальных заготовок операции подогрева и операции после сварочной термообработки осуществляют в термических печах по программам, хорошо известным из заводских технологических инструкций. Такого рода «печная» технология бывает необходима по двум причинам. Первая — это необходимость обеспечения точного рецепта температурных режимов во времени. Такой нагрев в стыковой машине обеспечить невозможно не только по величине температуры, но и по времени выдержки деталей при заданной температуре. Вторая причина: механически точно обработанные стальные заготовки нельзя подвергать грубому процессу выплавления металла методом прерывистого нагрева, особенно посредством размыканий контакта.

Вопросам термической обработки посвящена весьма обширная литература. Наиболее полно тема подготовительных и послесварочных операций для легированных сталей разработана в работе [5]. В ней сосредоточен огромный экспериментальный и рецептурный материал по стыковой сварке деталей различных конструктивных форм, из различных современных сплавов и сталей. Все эти процессы для стыковой контактной сварки можно считать традиционными.

3.5. Энергетика свариваемых стыковых контактов

Современное сварочное производство имеет возможность использовать для сварки и резки все виды энергии.

Рассмотрим для стыковых соединений это энергетическое многообразие в подробностях, иллюстрируя поступление энергии в зону сварного соединения посредством модели, показанной на

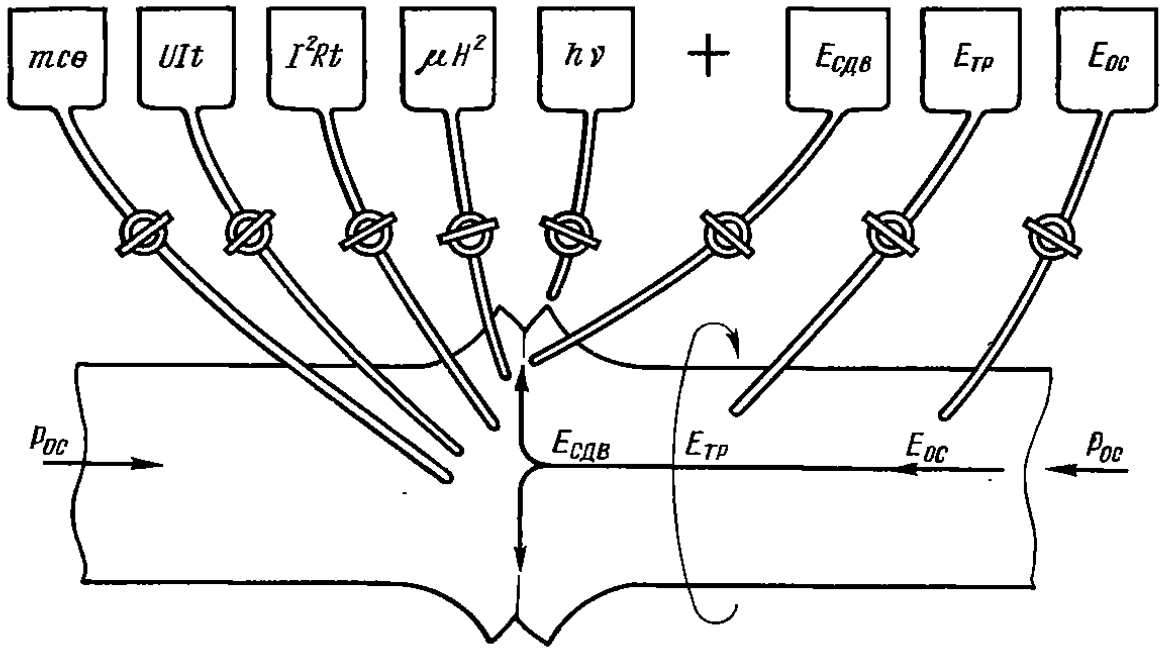


Рис. 3.17. Возможные источники энергии активации стыкового свариваемого контакта

рис. 3.17. Здесь источники энергии представлены в виде резервуаров, из которых технологом в зону сварки может быть введена любая энергия, по какой угодно программе. Количество и скорость ввода энергии регулируются некоторыми вентилями. Для схемы, приведенной на рис. 3.17, приняты такие обозначения:

$mc\theta$ — энергия экзотермических химических реакций: газовой горелки, термитной реакции, печного нагрева;

I^2Rt — энергия Джоуля в любых ее низко- и высокочастотных проявлениях;

UIt — энергия плазмы, различного рода разрядов: искровых, дуговых, тлеющих, взрывоискровых (оплавление), электронного луча;

μH^2 — энергия магнитных полей при любых частотах;

$h\nu$ — энергия фотонных потоков при квантово-лучевых процессах (лазеры).

Отдельно и особо следует рассмотреть механическую энергию. На схеме она представлена в трех видах: $E_{сдв}$ — энергия сдвига; $E_{тр}$ — энергия трения; $E_{ос}$ — энергия осадки. Как понимать эти виды энергии? Как известно, первый закон термодинамики

$$p = \eta\varepsilon^2/(2t) = \gamma cT \qquad (3.38)$$

говорит о том, что любая механическая энергия — растяжения, сжатия, сдвига — превращается в теплоту. И это превращение физически определяется сдвигами относительно друга друга: 1) элементарных кристаллов; 2) зерен (кристаллитов); 3) макроскопических объемов металла. Выражение (3.38) не может быть отнесено к элементарным кристаллам, поскольку константы γ и c свойственны массам металла.

Как было ранее показано, формулу (3.38) можно применить к элементарным кристаллам, если написать

$$p = \eta\varepsilon^2/(2t) = 3k\theta n, \qquad (3.39)$$

где уже фигурирует постоянная Больцмана k. Таким образом, температурный эффект любого вида сдвига может быть вычислен. Главное в том, чтобы разобраться, какой сдвиг и в какой именно зоне контакта происходит при операции осадки или другой деформирующей силе.

Рассмотрим стыковой контакт (см. рис. 3.12), на который действует осадочная сила $P_{\text{ос}}$. Она вносит энергию $E_{\text{ос}} = P_{\text{ос}}h_{\text{ос}}$, распределенную по всему деформируемому объему. Объем этот может быть существенно разным, в зависимости от величины и скорости введения энергии — механической, электрофизической или комбинированной. Например, искровой разряд батарей конденсаторов создает в контакте два тончайших слоя кипящего металла, осадочный удар будет концентрировать механическую энергию только на этот кипящий слой. Холодные слои металла, граничащие с кипящим, ударной осадки практически не почувствуют. Совершенно другие картины имеют место при современных режимах сварки контактной стыковой и трением. Здесь осадочная энергия рассредоточивается по всему объему нагретого металла. Однако самое характерное для всех процессов сварки — это то, чем завершается каждая осадочная операция, будь она медленной или быстрой, постоянной или переменной по величине.

Каждая операция осадки при стыковой сварке завершается эффектом межкристаллитного сдвига в целом металле, вокруг плоскости контакта и сдвигом тонкого слоя кристаллов непосредственно по плоскости контакта.

Сдвиг в целом металла подчиняется, как видно, макромасштабным измерениям и потому может с какой-то степенью достоверности оцениваться величиной температуры, которая определяется формулами (1.31) и (1.41), как показано здесь,

$$T_{\text{сдв}} = \frac{1}{2\gamma c t_{\text{сдв}}/(\eta\varepsilon^2) + 1/T_{\text{пл}}}, \qquad (3.40)$$

где $t_{\text{сдв}}$ — время, в течение которого осуществляется межзеренный сдвиг. Для стыковой контактной, для стыковой трением это время надо определять по-разному. При контактной стыковой сварке методом сопротивления детали в течение всего времени нагрева находятся под давлением, при этом время осадки и время нагрева равны. При контактной стыковой сварке методом непрерывного оплавления время осадки есть время только осадочной операции, завершающей нагрев. При сварке трением два времени: нагрева и осадки. Обычно давление нагрева и собственно давление осадки различны.

Таким образом, температурный вклад в нагреваемый объем металла по формуле (3.40) следует вычислять дважды и с учетом

указанных различий по давлениям. Но при современных относительно малых скоростях действия собственно осевой силы P_{oc} температурный эффект от этого будет получаться ничтожно малым.

Следует вспомнить и еще одну формулу:

$$T_{ср} = \frac{p_{oc} h_{oc}}{4\sqrt{\lambda\gamma c}\sqrt{t_{oo}}}, \qquad (3.41)$$

в которой p_{oc} — осевая осадочная энергия; h_{oc} — осевой размер осадки; t_{oc} — время этой осадки.

Какая же из этих двух формул [(3.40) или (3.41)] более достоверна? И могут ли они вообще определять одно и то же число? Одинаковые числа они давать не должны не только потому, что может быть некоторая неполная согласованность физических констант: η и $\lambda\gamma c$. Дело в том, что формула (3.41) с ее энергией $p_{oc}h_{oc}$ дает температурную вспышку от действия осевой силы, а формула (3.40) с ее константой η — от перпендикулярно направленных радиальных сил сдвига. Однако эффект сдвига возникает от действия осевой осадочной силы P_{oc}, которая и является первоисточником всей сдвиговой деформации. Металл, однако, нагревается при всякой пластической деформации. В формуле (3.38) содержится и тепловая константа c, и деформационная η. Из формулы (3.40) поэтому получим более достоверные значения температуры, возникающей при деформации, чем из (3.41).

Сравним формулы (3.40) и (3.41) посредством численных расчетов. Для этой цели используем опытные данные ВНИИЭСО для конкретных условий холодной сварки. Надо сказать, что из всех способов сварки давлением процесс холодной сварки до сих пор оказывается теоретически наиболее загадочным. Тем не менее физическая картина сваривания будет как-то связана с расчетным числом. Сваривались медная и алюминиевая проволока диаметром 3,5 мм. Длина выступающих из зажимных губок концов устанавливалась, в зависимости от диаметра, в определенных соотношениях l/d. Осадочная энергия p_{oc} измерялась в момент завершения осадки, измерялось время осадки t_{oc} (с). На основании этого была составлена таблица опытных и расчетных данных (табл. 3.1).

Если эти температурные расчеты дали в какой-то мере даже завышенные значения температур, то возникает недоумение: как же может происходить не только схватывание, но и сваривание проволок при таких в общем-то низких температурах? Видимо, здесь надо исходить из следующих физических представлений.

1. Каждый акт сваривания как явление формирования непрерывной кристаллической структуры по плоскости контактирования происходит со скоростью звука. Для расстояний, сравнимых с размерами атомов и кристаллов это время составляет 10^{-13} с.

2. Каждый процесс сварки давлением завершается эффектом атомно-кристаллического сдвига по плоскости контакта. На этот сдвиг тратится или вся, или частично осадочная энергия. Атомно-

Таблица 3.1. Основные параметры режимов

Параметр	Медь	Алюминий
Опытные числа и физические константы		
t_{oc}, с	0,6	1,0
l/d, %	80	50
p_{oc}, Дж/см^3	1300	550
$\sqrt{\lambda\gamma c}$, Дж/см$^2\cdot$с$^{1/2}\cdot$°С	3,77	2,35
η, Дж·с/см^3	1200	1028
Расчетные числа		
$T_{сдв}$, °С — см. формулу (3.40)	129	203
$T_{ср}$, °С — см. формулу (3.41)	48	76

кристаллический сдвиг по плоскости контактирования создаст в тонком слое кристаллитов или даже элементарных кристаллов температурный импульс, всегда превышающий точку плавления для слоя металла, участвующего в эффекте сваривающего сдвига.

Исходя из этих положений, произведем некоторые дополнительные расчеты. Осевая осадочная энергия $P_{oc}h_{oc}$ по плоскости контакта превращается в радиально расходящуюся энергию сдвига

$$E_{сдв} = p_{сдв}z\delta S, \qquad (3.42)$$

если считать z — число слоев элементарных кристаллов, участвующих во взаимном сдвиге; δ — параметр решетки кристалла; S — площадь контактирования.

Ранее, в гл. 1, была получена формула (1.39) для расчета температуры в плоскости контакта $T_к$, если в плоскости контакта концентрируется любая энергия. Для энергии сдвига [см. формулу (3.42)], как видно, можно написать расчетную формулу типа (1.39), если сохранить в ней константы, действительные для микрообъема. Это значит, что равенство (1.39) надо изменить так:

$$qt = 3k\theta nS2x \qquad (3.43)$$

при тех же самых $x = 2\sqrt{at}$.

Поскольку $qt = p_{сдв}z\delta S$, подставляя

$$p_{сдв}z\delta S = 12kn\theta S\sqrt{at},$$

получаем выражение для температуры

$$\theta = pz\delta/(12kn\sqrt{at}).$$

В данном случае речь идет о сдвигах на расстояние параметра решетки, поэтому

$$t = 1/\nu_{зв},$$

где $\nu_{зв}$ — звуковая частота, определяемая как скорость звука $c_{зв}$, отнесенная к параметру кристалла δ.

И теперь получаем:

$$\theta = \frac{p_{сдв}^2}{12kn}\sqrt{\frac{\delta c_{зв}}{a}}. \qquad (3.44)$$

Скорость звука $c_{зв}$ определяется так:

$$c_{зв} = \sqrt{G/\gamma}, \qquad (3.45)$$

где G — модуль сдвига, $Н/м^2 = кг \cdot м/(с^2 \cdot м^2)$.

На основе этих выводов можно представить себе сущность холодной сварки в виде физической схемы, излагаемой следующим образом. Как было показано расчетами, осадка в макрообъеме создает недостаточный нагрев. Оценим количественно температуру, достигаемую при плоскостном сдвиге [см. формулу (3.44)]. Из нее получаем равенство

$$\frac{p_{сдв}^2}{kn\theta_{пл}}\sqrt{\frac{\delta c_{зв}}{a}} = 12. \qquad (3.46)$$

Как видно, число 12 — это значение критерия $K_{сдв}$ для энергии сдвига, если температура эффекта сдвига равна точке плавления $\theta_{пл}$. Принимаем следующие физические константы:

	$\theta_{пл}$	$\delta \cdot 10^{-8}$, см	$n \cdot 10^{22}$, атом/см³	$c_{зв} \cdot 10^{6}$, см/с	a, см²/с
Для меди	1356	2,55	0,85	0,384	0,82
» алюминия . . .	923	2,86	0,60	0,584	0,80

Для холодной сварки меди и алюминия снова используем опытные рекомендации ВНИИЭСО:

	l/d, %	$p_{сдв}$, Дж/см³
Для меди	75—125	1250—1450
» алюминия	50—100	550—800

По этим данным формула (3.46) определяет следующее число слоев элементарных кристаллов, участвующих во взаимном сдвиге:

Число слоев z	140—120	115—80
Общая толщина слоев Δ, мкм	0,35—0,3	0,33—0,23

Как видно, толщина сдвига настолько мала, что не просматривается с помощью обычных систем оптических микроскопов. И тем не менее плоскостный эффект сдвига, завершающий осадку, дает тот самый необходимый для сваривания высокотемпературный импульс, который и завершает процесс формирования непрерывной кристаллической структуры по контактной плоскости. К моменту сваривающего микросдвига контактная плоскость образуется внутренними слоями металла. Поскольку все загрязнения были вытеснены осадкой, сдвиг происходит по идеально чистому металлу. Все изложенные здесь расчеты и соображения относятся к холодной сварке. Для других процессов сварки давлением, например сварки трением, экспериментальные и расчетные числа будут совсем другие.

Те же формулы (3.44) и (3.46), имея в своем составе скорость звука, для трения должны давать значительно меньшие значения. Это следует из формулы (3.45), в которой модуль сдвига G сильно падает для горячего металла, особенно нагретого до температуры, близкой к точке плавления. Согласно выражениям (1.39) и (1.51), температуру в плоскости контакта за счет энергии трения можно определить так:

$$T_{тр} = \frac{p_{тр}\pi d_{ср} n \sqrt{t_{тр}}}{240\sqrt{\lambda\gamma c}}, \qquad (3.47)$$

где $p_{тр}$ — энергия в контакте, вызываемая трением; $d_{ср}$ — средний размер диаметра свариваемой детали; n — частота вращения детали, об/мин; $t_{тр}$ — длительность операции трения.

Завершающая осадочная операция в зоне свариваемого контакта обеспечивает подъем температуры в результате межзеренного радиального сдвига, который может быть учтен формулой

$$T_{сдв} = \frac{1}{2\gamma c t_{ос}/(\eta_0 \varepsilon^2) + 1/T_{пл}}. \qquad (3.48)$$

При практических расчетах по этой формуле $t_{ос}$ — время действия завершающего осадочного давления.

Относительная деформация ε при сварке трением для разных металлов и различных осадочных давлений получается в пределах 0,5—0,7, редко достигая 0,8. Этот размер можно приближенно определить по формуле (3.31)

$$\varepsilon \approx 1 - d^2/D^2, \qquad (3.49)$$

где d — диаметр свариваемого стержня; D — диаметр деформированного контакта.

Учитывая все это, произведем конкретные расчеты для сварки трением круглых стержней диаметром 2 см. Средний размер диаметра будем, следовательно, принимать $d_{ср} = 1$ см. Опытные данные ВНИИЭСО для стержней из стали Ст3: $p_{тр} = 50$ Дж/см^3; $t_{тр} = 6{,}25$ с; $n = 1000$ об/мин. Коэффициент аккумуляции

$$\sqrt{\lambda\gamma c} = 1{,}47 \text{ Дж/см}^2 \cdot \text{с}^{1/2} \cdot {}^\circ\text{С}.$$

Температура плоскости контакта за счет операции трения по формуле (3.47)

$$T_{тр} = \frac{50 \cdot 3{,}14 \cdot 1000 \cdot 2{,}5}{240 \cdot 1{,}47} = 1112{}^\circ\text{С}.$$

По размерам D и d, согласно формуле (3.49), относительная деформация оказалась порядка 0,7. По этим данным можно определить: достаточной ли была осадочная энергия 100 Дж/см^3. Допустим, что динамическая вязкость, вычисленная для чистого железа, такая же и у стали Ст3. Тогда

$$\eta = \eta_0 (1 - T_{тр}/T_{пл}) = 1836 (1 - 1112/1450) = 422 \text{ Дж} \cdot \text{с/см}^3.$$

Длительность операции осадки не измерялась, но это время можно считать, как и время сдвига t_{oc}, равным 1 с. Тогда

$$p_{oc} = \eta\varepsilon^2/(2t) =$$

$$= 422\,(0{,}7)^2/(2\cdot 1) = 103{,}4 \text{ Дж/см}^3.$$

Как видно, действовавшее осадочное давление и расчетное совпадают. Теперь можно определить, какой температурный вклад в микрообъеме создает сдвиг, завершающий сварку,

$$T_{сдв} = \frac{1}{2{,}5\cdot 1/(1836\cdot 0{,}5) + 1/1450} = 86^\circ\text{C}.$$

Вклад сравнительно небольшой. Он, суммируясь с температурой $T_{тр}$, дает общую температуру в плоскости контакта 1112 + + 86 = 1198 °С. Действовавшее при сварке давление p превышает то необходимое, какое требует формула (1.21):

$$p = \sigma_т\,[1 + d/(6h)].$$

Можно проделать аналогичные расчеты и для дюралюминия. Для стержней диаметром 2 см опытные данные таковы: $t_{тр} = 3{,}5$ с; $p_{тр} = 50$ Дж/см^3; $\sqrt{\lambda\gamma c} = 2{,}35$ Дж/см$^2\cdot$с$^{1/2}\cdot$°С; $p_{oc} = 100$ Дж/см^3; $n = 1000$ об/мин. Тогда

$$T_{тр} = \frac{50\cdot 3{,}14\cdot 1\cdot 1000\cdot 1{,}87}{240\cdot 2{,}35} = 520^\circ\text{C}.$$

Относительная деформация, согласно формуле (3.49), близка к 0,8. При времени $t_{oc} = 1$ с

$$T_{сдв} = \frac{1}{2{,}27\cdot 1/(1028\cdot 0{,}64) + 1/650} = 103^\circ\text{C}.$$

Суммарная температура контакта 623° меньше точки плавления. Осадочная энергия $p = 100$ Дж/см^3 не только значительно превышает предел текучести при действующей температуре, но и давление, устанавливаемое из формулы (1.21). Проделанные расчеты дают основание для следующих выводов.

Основной подъем температуры при сварке трением обеспечивается именно операцией трения. Однако и осадочная операция, согласно формуле для температуры сдвига $T_{сдв}$, может вносить заметный вклад, если операцию осадки делать ускоренной, например вместо 1 с осаживать за 0,5 с. Однако это повлечет за собой необходимость заметного увеличения осадочного давления. Такого увеличения можно избежать и избегают при инерционной сварке трением. В этом процессе осевая осадка суммируется с поворотом по плоскости контакта.

Расчеты по формуле (3.44) для горячего металла дают ничтожно малые значения температур. Для контактной стыковой сварки действительны те же выводы о влиянии осадочных скоростей на температурную картину в зоне свариваемого контакта. Здесь относительная деформация может достигать значения $\varepsilon = 80$ %.

Если время осадочной операции вместо одной секунды сократить до половины, то, согласно формуле (3.48), получим

$$T_{\text{сдв}} = \frac{1}{2{,}5 \cdot 0{,}5/(1836 \cdot 0{,}64) + 1/1450} = 202^\circ\,\text{C}.$$

Такая мгновенная температурная добавка в момент осадки вполне объясняет задержку охлаждения сваренного контакта, что было показано на рис. 3.14. Ускорение осадки можно получить только увеличением осадочного давления.

Осевое сжатие может быть заменено поворотной деформацией, которая в некоторых случаях может оказаться рациональной, обеспечивая после процесса оплавления устранение непроваров и несплошностей. Если, для примера, те же стальные стержни диаметром 2 см нуждались при сварке трением в осадке на 3 мм, то достаточно одного неполного поворота, заменяющего такую осадку. Кстати сказать, инерционная сварка трением, какую по сути дела предложил А. И. Чудиков, дает бóльшую стабильность прочности, чем принцип машин трения ВНИИЭСО, где процесс сварки завершается остановкой вращения и осевой осадкой. У А. И. Чудикова осевая осадка завершалась последним поворотом.

Неоднократно возникал вопрос о возможностях холодной сварки стальных деталей. При таком же времени осадки в 1 с, как это характерно для холодной сварки алюминия и меди, сталь сваривать весьма затруднительно. Следует учесть, что динамическая вязкость, равная 1836, рассчитана для чистого железа. Для сталей это число должно быть, вероятно, бóльшим, в такой же пропорции, как больше оказывается предел текучести стали по сравнению с этой же величиной для армко-железа. Практически динамическая вязкость перейдет за 2500. Встает вопрос, какими же должны быть все зажимные и осадочные механизмы, чтобы выдерживать секундные удары давлением, выше 2500. Вряд ли возможны такие конструкции машин. Вполне понятно, что технология сварки пошла по пути полного освобождения от металлических зажимных и осадочных устройств. Такой технологией стала сварка взрывом. Для этого процесса формулы (3.41) и (3.48) непригодны. Первая из них потому, что физическая константа $\lambda\gamma c$, известная по статическим «печным» измерениям, вряд ли справедлива для ударных процессов, а вторая, (3.48), вообще не предусматривает какого-либо значения для коэффициента динамической вязкости при температурáх выше точки плавления. Температура при сварке взрывом, судя по авторитетным вычислениям, значительно превышает точку плавления. Произведем и здесь некоторые ориентировочные расчеты. Еще раз обратим внимание на две возможные ошибки, какие довольно часто допускают исследователи в различных расчетах.

1. Все физические, электрические и механические константы для металла получены в экспериментах с печным нагревом и медленным изменением действующих механических сил. Использо-

вать эти известные и привычные константы для многих сварочных процессов следует с большой осмотрительностью.

2. Исследователи редко относятся с полным вниманием к принципу всеобщей связи явлений.

Обе эти ошибки приводят к тому, что в быстропротекающих или даже ударных сварочиых процессах ведутся расчеты с пределами текучести, которые давным давно добыты статическими растяжениями. Мало того, почти все процессы сварки идут с использованием электрических токов, как угодно циркулирующих по свариваемым деталям и непредвиденно создающих концентрированную в отдельных микрозонах электромагнитную и тепловую активацию. К сожалению, почти никогда не учитывается наличие электрических процессов в металле и в тех сварочных операциях, которые непосредственно идут под действием только механической энергии. Рассматривая, например, чисто механическое понятие релаксации, определяем его как процесс перехода металла из одного структурно установившегося состояния в другое, тоже стабилизированное. Длительность этого процесса, или, как говорят, время релаксации, определяется так:

$$\tau = \eta/G, \tag{3.50}$$

где η — динамическая вязкость; G — модуль сдвига.

Стоит еще раз обратить внимание на выражение (3.38). Если его относить так же, как это характерно для определения (3.50), к относительному удлинению $\varepsilon = 1$, то

$$t = \eta/(2p_{\text{сдв}}) \tag{3.51}$$

полностью подобно определению (3.50).

Разница между этими соотношениями только та, что τ — это константа для холодного металла, а t — это всегда переменная величина, зависящая от действующей сдвиговой силы. Однако, если учесть, что изменения динамической вязкости и модуля сдвига от температуры почти подобны, то соотношение (3.50) для горячего и тем более расплавленного металла утрачивает, вероятно, смысл. Соотношение (3.50) — это понятие для макрообъемов, так как модуль сдвига — это статическая характеристика металла:

	G, Дж/см³	η, Дж·с/см³	τ, с
Для алюминия .	27	1028	0,038
» меди .	44	1200	0,027
» железа .	84	1836	0,021

Время релаксации определяет поведение металла по отношению к действующей на него деформирующей силе. Если время действия силы значительно больше времени релаксации [т. е. согласно соотношениям (3.50) и (3.51) $t > \tau$], то металл ведет себя как вязкая жидкость. Это наблюдается при холодной сварке пластичных металлов: алюминия и меди. Если же время действия силы t меньше времени релаксации τ, то металл ведет себя как твердое и даже иногда как хрупкое вещество. Такая картина,

видимо, может быть характерна для сварки взрывом, если вести речь о макрообъемах.

Но возвращаясь снова к холодной сварке и ее конечному эффекту плоскостного межкристаллического сдвига, нужно признать, что этот сдвиг ввиду его кратковременности происходит как бы в слое твердого металла, мгновенно переходящего в состояние расплава и тут же снова превращающегося в твердое состояние. И все-таки факторы времени в этих процессах какие-то особенные. Стабилизация электронных плотностей длится в течение не долей секунд, а минут. И здесь снова приходится сталкиваться с несовместимостью явлений в металле в микро- и макрообъемах. Понятие модуля сдвига к электронным конфигурациям неприложимо, так же как неприложима к ним и динамическая вязкость.

Температура — это мера энергии массы движущихся частиц. Однако и частицы, т. е. атомы и свободные электроны, весьма различны не только по массам, но и по самой их природе и по их физическим свойствам. Не выходя за рамки макроскопических объемов, мы вправе оперировать с величинами модуля сдвига. Динамическая вязкость действительна для металла от кристаллов до любых макроскопических размеров. Эта физико-механическая характеристика более универсальна, чем модуль сдвига. Можно еще раз обратить внимание на подобие этих характеристик металла. Формулы (3.50) и (3.51) говорят о том, что граница хрупкого разрушения и вязкого течения металла определяется сдвиговой энергией, создаваемой сдвигом $p_{сдв}$,

$$p_{сдв} = G/2. \qquad (3.52)$$

Если известные опытные значения модуля сдвига для холодного металла считать достоверными, например, для процесса сварки взрывом, то получаются значения ударной энергии сдвига, при которых пластическое (вязкожидкостное) течение металла переходит в хрупкое разрушение. Согласно (3.52), эти значения таковы: для алюминия 13 500, для меди 22 000, для железа 42 000 Дж/см^3. Бо́льшие энергии уже могут вызывать хрупкое поведение твердого металла, так как время действия ударного сдвига меньше времени релаксации.

Все эти соображения, согласно приведенным выше соотношениям, действительны только для холодного металла. Если, однако, обратить внимание на то, что в зависимости от температуры металла обе характеристики η и G меняются подобно, то соотношение t/τ, равное, согласно (3.50) и (3.51),

$$t/\tau = G/(2p_{сдв}), \qquad (3.53)$$

должно быть действительным и для горячего металла.

Рассмотренные здесь связи модуля сдвига и действующих энергий сдвига могут быть распространены и для растягивающих напряжений. С этой точки зрения появление трещин при осадочных операциях горячего металла может быть объяснено двумя причинами.

1. Это неполностью синхронизированное изменение по температуре модуля сдвига G и динамической вязкости η. Может оказаться, что скорость изменения $\partial G/\partial T$ будет больше $\partial\eta/\partial T$ и тогда относительно малое значение знаменателя в соотношении (3.50) даст большое значение времени релаксации. Металл поведет себя как хрупкий.

2. Такой же локализованно хрупкий эффект может оказаться мгновенно существующим, если и при относительно большом значении модуля сдвига энергия сдвига окажется концентрированно очень высокой. Это будет происходить всякий раз в зонах резко концентрированных структурных включений, резких геометрических переходов и концентраций дефектов. Тогда, согласно (3.53), малое время действия мгновенной энергии сдвига сделает металл хрупким в зоне действия этой энергии. Отсюда и могут возникать осадочные трещины.

В связи с опасностями такого рода при стыковой контактной сварке всегда рационально обеспечивать осадку, не выключая сварочного тока. Вокруг всякого дефекта, концентрирующего механические напряжения, электрический ток и его магнитный поток создают также свои собственные концентрации. Если концентрация механического сдвига усиливает разрушение, то электромагнитное поле своей концентрацией может противостоять этим действиям. И концентрация тока, и магнитный поток вызывают значительный и мгновенный нагрев в зоне концентрации. Нагревы могут доводить металл до мгновенного плавления, когда не только залечиваются микротрещины, но и резко меняется структурная картина со всеми ее бывшими микродефектами. Влияние электромагнитных полей на трещинообразование при сварке полезно иметь в виду и исследователям прочностных свойств соединений при дуговой сварке. Оказывается совершенно небезразлично, как подводился сварочный ток к сварным образцам, с какой именно стороны и в каком направлении. И сварочный ток, и магнитное поле при сварке могут быть и не быть полезными концентраторами.

Концентрации механических напряжений могут наблюдаться и не только в технологии сварки давлением. Эффекты сдвига имеют место и за счет термических циклов, без участия сварочных осадочных давлений. Как видно, принцип всеобщей связи явлений не следует забывать никакому технологу-сварщику.

Глава 4

ТЕХНОЛОГИЯ ТОЧЕЧНОЙ И РЕЛЬЕФНОЙ СВАРКИ

4.1. Формирование точечно-сварных соединений

К сварке давлением контактная точечная сварка может быть причислена только по чисто внешнему признаку — сжатию деталей электродами точечной машины. Что же касается формирова-

ния ядра сварной точки, то здесь идет самый настоящий процесс плавления, поскольку все оксидные и адсорбционные наслоения не выдавливаются, а растворяются в расплавленном ядре. По многообразию технологических переменных контактная точечная сварка представляет собой, вероятно, один из самых сложных способов сварки.

Действительно, сварные конструкции весьма многообразны по формам и размерам; сварные конструкции и соединения изготавливаются практически из любых металлов и сплавов, с самыми различными физическими характеристиками. Режимы сварки — сварочный ток и механическое давление — в современной практике весьма сложно программируются. В целом технологический процесс по его отдельно регулируемым этапам можно разделить на следующие операции: 1) подготовка деталей к сварке; 2) электронагрев по предусмотренной программе; 3) охлаждение деталей по определенной термомеханической программе.

Подготовка деталей к сварке здесь рассматриваться не будет. Это процессы рецептурно-описательные, хорошо известные по соответствующим заводским инструкциям и руководствам. Следует отметить только, что особое внимание подготовке поверхности уделяется в тех цехах, где идет сварка сплавов алюминиевых, магниевых и титановых.

Стальные конструкции изготавливают преимущественно из холодного проката, не всегда даже нуждающегося в удалении масляных покрытий. Для горячекатаных стальных заготовок используют как механические, так и химические способы зачистки. Самым сложным и самым ответственным этапом технологии является процесс плавления ядра, т. е. этап электронагрева. Как было показано ранее, формирование расплавленного ядра начинается с образования тонкого диска (см. рис. 2.22, *в*) сначала из горячего, а затем из расплавленного металла. Скорость подъема температуры этого диска может измеряться при импульсных режимах десятками тысяч градусов в секунду.

В первый же момент включения сварочного тока в плоскости свариваемого контакта начинается самый нестабильный период формирования расплавленного ядра. Давление электродов практически при любой программе его приложения уже не способно сколько-нибудь заметно изменить электрическое сопротивление контакта микропирамид против того значения, которое определилось первоначальным их ударом. В этот начальный момент только специальная программа нарастания сварочного тока может в значительной мере стабилизировать тепловыделение. На рис. 4.1 для одного из частных случаев представлены опытные графики изменения диаметра ядра $d_т$ и его высоты h в зависимости от температуры в плоскости контакта. Полное сваривание пластин из стали Ст3 толщиной 4 + 4 мм при диаметре ядра $d_т = 14$ мм и высоте ядра $h = 4$ мм получилось при следующих параметрах:

1) $I = 15$ кА; $t = 2$ с; $P = 8$ кН; $h/\delta = 1$; критерий К = 46;

2) $I = 15$ кА; $t = 4$ с; $P = 12$ кН; $h/\delta = 1$; критерий $K = 44$.

Сопоставляя эти данные с рис 4.1, можно видеть, что диаметр диска предельного размера сначала горячего, а затем и расплавленного металла образуется за малую долю от всего времени включения тока. Что же касается высоты ядра, то она растет, достигая желательного размера к концу сварки. Картина распределения температур получается весьма сложной. Подходить с расчетным аппаратом к этой картине надо с большой осторожностью. Если иметь в виду самый начальный момент формирования пока еще горячего диска, а не расплавленного металла, то это, вероятно, соответствует $t = 0{,}1$ с. В этот момент температура горячего диска, как измерено, 950—1050 °С. Примем среднюю $T = 1000$ °С. Средний размер диаметра этого диска $d_{ср} = 0{,}95$ см. Соответственно, $\pi d_{ср}/4 = 0{,}708$ см^2. Энтальпия горячего диска

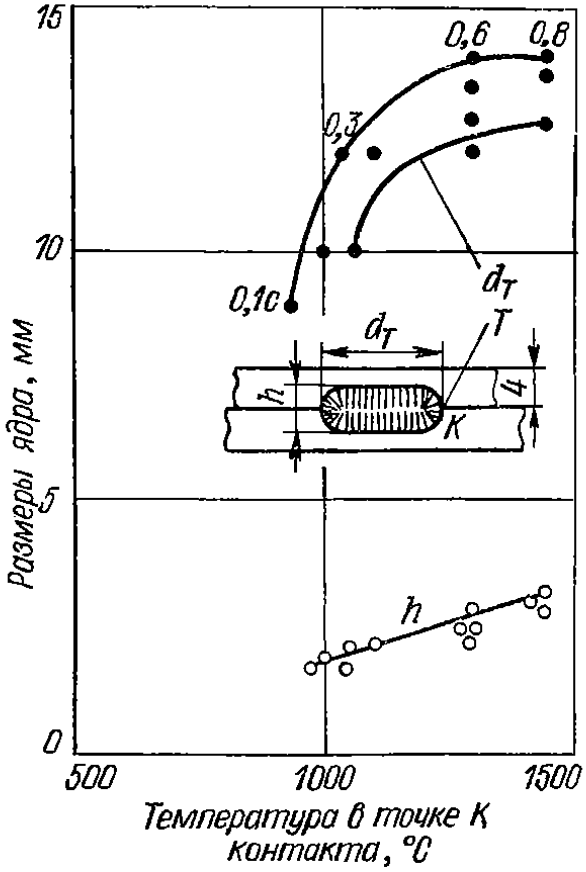


Рис. 4.1. Изменение размеров диаметра и высоты ядра в зависимости от температуры на краю сварной точки

$$\gamma c S h T = 5 \cdot 0{,}708 \cdot 1000 h = 3540h.$$

Время относительно полного времени сварки весьма мало ($t = 0{,}1$ с). Размер h, согласно рис. 4.1, тоже мал. Именно для такого момента можно принять следующую расчетную схему. Источник теплоты — это диск, через который вводится энергия в плоскость контакта,

$$I^2 \rho t/d = 3540h = 225 \cdot 10^6 \cdot 20 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}1/0{,}95.$$

Из этого равенства получаем: $3540h = 473$; $h = 0{,}13$ см $= 1{,}3$ мм. Расчет, как видно из рис. 4.1, совпадает с измерением на реальном макрошлифе. Следовательно, для такого малого момента времени расчетная схема была правомерной. Для нее было принято, что окружающая масса металла была холодной, что, соответственно, и учтено значением удельного сопротивления, равным $\rho = 20 \times 10^{-6}$ Ом·см. Однако дальше растет не только температура диска и его высота, но сам горячий диск превращается в расплавленное ядро, принимая заданные размеры. Тепловой расчет по схеме $I^2 \rho t/d = \gamma c S h T$ уже не отвечает реальной действительности, так как необходимо учитывать тепловые потери сначала в массу листов, а затем и в электроды. Энергию, которую вводят в металл,

приходится учитывать уже не как $I^2\rho t/d$, а как сумму двух источников: $Q_к$ [см. формулу (2.80)] и $Q_{эм}$ (тепловыделения в переходных контактах электродов с металлом). Используем равенство (2.85) для конкретных расчетов. Тепловые потери в металл выразим в виде двух слагаемых (см. рис. 2.26): отдельно от расплавленного ядра $q_{ям}$ и от слоя металла между ядром и переходным контактом $q_м$. Эти слагаемые определяются по формулам:

$$q_{ям} = T_я \sqrt{\pi\lambda\gamma c}\sqrt{t}\ \pi d_т h; \qquad (4.1)$$

$$q_м = \frac{T_я + T_{п.м}}{2}\sqrt{\pi\lambda\gamma c}\sqrt{t}\ \pi d_т (2\delta - h), \qquad (4.2)$$

где $T_я$ — температура ядра, которую, вероятно, следует принимать равной точке плавления, несмотря на то что в центральных зонах этого ядра действительные температуры на 100—200° превышают точку плавления. Температура поверхности металла под электродами $T_{п.м}$ — величина весьма нестабильная. Так, непосредственные измерения показали температуру $T_{п.м} = 500 \div 700$ °С при сварке стальных листов толщиной 4 + 4 мм в течение 2 с и $T_{п.м} = 700 \div 900$ °С при сварке в течение 3 с.

По этим данным можно судить о том, что тепловыделение в переходных контактах, пожалуй, еще более нестабильная величина, чем в свариваемом контакте. Тепловые потери в электроды $2q_э$ также не отличаются стабильностью:

$$q_э = T_э \sqrt{\pi(\lambda\gamma c)_м}\sqrt{t}\,\frac{\pi d_т^2}{4}. \qquad (4.3)$$

В этом равенстве константы $(\lambda\gamma c)_м$ относятся к электродам, а температура электродной плоскости $T_э$ должна быть принята на 100—200° меньше температуры поверхности металла под электродом. Приведенные ниже расчеты сопоставим с измерениями полной энергии, которая выделяется между электродами. Расчеты и измерения относятся к конкретному примеру сварки тех же стальных пластин, о которых шла речь выше. Для условий $I = 15$ кА, $t = 4$ с, $h/\delta = 1$ произведем вычисления всех слагаемых тепловыделения и тепловых потерь. Примем следующие постоянные: $\rho_т = 140$ мкОм·см; $d_т = 1{,}4$ см; $d_э = 1{,}2$ см; $h = 0{,}4$ см; $\pi d_т^2/4 = 1{,}53$ см^2; $T_{пл} = 1450$ °С; $T_{п.м} = 850$ °С; $T_э = 700$ °С. Для стали $\gamma c = 5$ Дж/(см^3·°С), $T_{пл}\sqrt{\lambda\gamma c} = 2130$ Дж/(см^2·с$^{1/2}$); для меди $\sqrt{\lambda\gamma c_м} = 3{,}77$ Дж/(см^2·с$^{1/2}$·°С).

Соответственно:

$$Q_к = 225 \cdot 10^6 \cdot 140 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}4 \cdot 4/1{,}53 = 33 \text{ кДж};$$

$$q_{тс} = 5 \cdot 1450 \cdot 1{,}53 \cdot 0{,}4 = 4{,}44 \text{ кДж};$$

$$q_{ям} = 2130 \cdot 1{,}77 \cdot 2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}4 \cdot 1{,}4 = 13{,}3 \text{ кДж};$$

$$q_м = q_{ям}(1450 + 850)/(2 \cdot 1450) = 10{,}5 \text{ кДж};$$

$$2q_э = 2 \cdot 700 \cdot 3{,}77 \cdot 1{,}77 \cdot 2 \cdot 1{,}13 = 21{,}1 \text{ кДж}.$$

Сумма всех энергетических слагаемых

$$q_{тс} + q_{нм} + q_м + 2q_э = 49{,}3 \text{ кДж}.$$

Приведенный метод расчета, разумеется, приближенный. Тем не менее полученные значения характеризуют соотношение энергетических затрат на все действительные тепловые потери. По расчетным материалам такого рода можно получить довольно характерные энергетические показатели. Если принять за 100 % сумму всех слагаемых, то доли отдельных составляющих для некоторых режимов следующие:

	$q_{тс}$, %	$q_{нм} + q_м$, %	$q_э$, %
Для дюралюминия (3 + 3 мм)	6	45	49
Для стали Ст3:			
4 + 4 мм . .	8	49	43
0,35 + 0,35 мм . . .	10	23	67
Для коррозионно-стойкой стали (3 + 3 мм)	14	42	44

Если считать, что составляющая $q_{тс}$ только и есть полезная энергия, то общий энергетический КПД для всех металлов очень низок. Отвод теплоты в массу свариваемого металла почти одинаков для разных металлов, но только не для самых малых толщин (менее 1 мм). Почти одинаковы и потери теплоты в электроды. Надо, впрочем, иметь в виду, что эта составляющая — самая нестабильная в условиях производства, поскольку различны не только конструкции электродов, но и непостоянны размер наконечника и состояние его поверхности.

Каковы бы ни оказывались энергетические соотношения, в реальной действительности конечной целью процесса нагрева является создание расплавленного ядра, размеры которого согласно ГОСТ 15878—79 определяются диаметром $d_т$ и высотой h. Микро- и макроструктура ядра сварной точки и зоны термического влияния могут быть самыми разными, в зависимости от физических свойств металла и технологии создания точки. Есть, однако, некоторые типовые структурные картины, которые можно рассмотреть с помощью рис. 4.2.

Расплавленное ядро, разумеется, никто не видел. Наблюдают это ядро уже в холодном кристаллизованном состоянии. Скорости охлаждения расплавленного ядра после выключения тока весьма велики: при сварке деталей небольших толщин они достигают десятков тысяч градусов в секунду. Параметры такого рода могут создавать и необычайные псевдозакалочные структуры в стальной фольге с содержанием углерода даже менее 0,01 %. Высокие скорости охлаждения, особенно в первое мгновение после выключения тока, обеспечивают по границам расплава мелкозернистую корочку (зона *I*, рис. 4.2). В это мгновение одновременно образуется большое число центров кристаллизации. Вслед за созданием мелкозернистой тонкой корочки рост кристаллов в виде столбчатых дендритов (зона *II*) идет более замедленно и так фор-

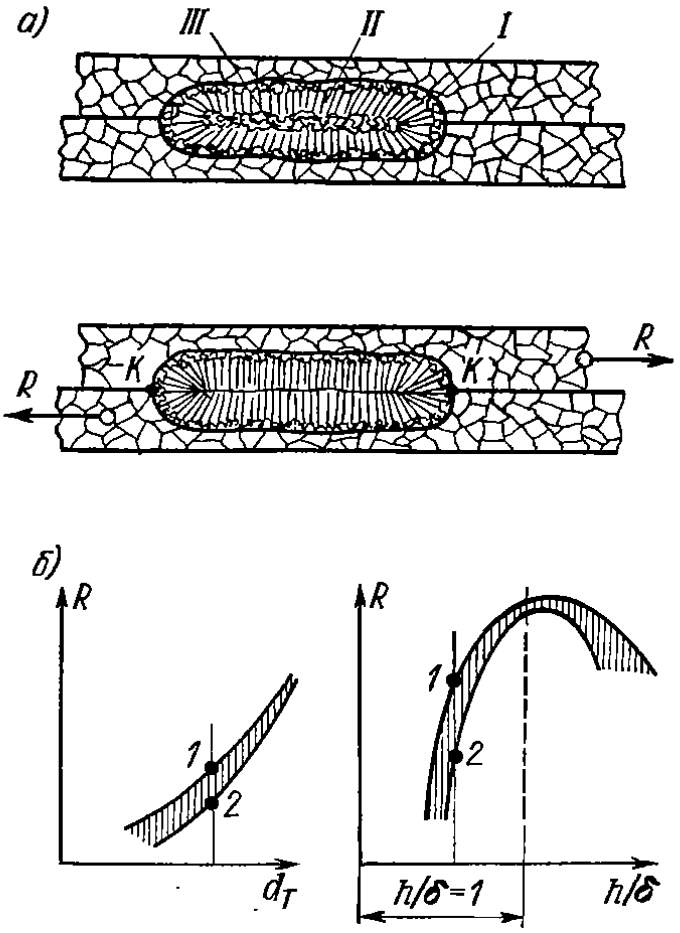


Рис. 4.2. Сварка коррозионно-стойкой аустенитной стали; структура ядра (*а*) и типовые зависимости прочности сварной точки на разрыв ($d_т$ — диаметр ядра) (*б*)

мирует ядро до конца, если скорости охлаждения высоки. Дендриты встречаются друг с другом или непосредственно (рис. 4.2, *а*, зона *III*), или с переходом в новую мелкозернистую, приблизительно равноосную структуру (рис. 4.2, *а*, верх). Прочность единичной точки R на разрыв определяется размерами расплавленного ядра. Типовые характеристики R в зависимости от размеров диаметра $d_т$ и высоты ядра показаны на рис. 4.2, *б*. Результаты многочисленных испытаний сварных соединений обычно показывают значительный разброс характеристик. Этот факт объясняется главным образом тем, что концентрация напряжений в точках KK (рис. 4.2, *а*) вносит заметный элемент нестабильности в показатели разрывной прочности. Практически при одном и том же диаметре $d_т$ разброс показателей прочности может достигать ± 20 % относительно среднего значения R, особенно при малых $d_т$ и высоте h (точки *1* и *2* на рис. 4.2, *б*). Здесь «виновен» не только эффект концентрации напряжений. В малом объеме расплавленного ядра оказываются значительные концентрации всех оксидных и даже адсорбционных наслоений, которые располагались в плоскости холодного контакта. При точечной сварке эти наслоения не выдавливаются, как это бывает при стыковом контакте, а растворяются в расплаве ядр. Наиболее стабильная прочность одноточечного соединения обеспечивается при отношении h/δ, приблизительно равном единице. Однако ГОСТ 15878—79 предусматривает такие допустимые соотношения h/δ:

Для магниевых сплавов . . .	От 0,4 до 1,4
» титановых »	» 0,4 » 1,9
» сталей всех типов	» 0,4 » 1,6

Для всех металлов предусмотрен, как видно, определенный минимум высоты ядра. Максимум определяется свойствами металла. Для высокотеплопроводных сплавов (алюминиевые, медные) проплавление более 1,4 и не нужно, и труднодостижимо

из-за активного охлаждения электродами зоны ядра. Все теоретические и технологические материалы этого параграфа относятся только к сварке однородных металлов одинаковой толщины. Современное машиностроение отличается применением для точечно-сварных конструкций сложнолегированных сталей и сплавов. Для них структурные картины настолько разнообразны, что обязывают металловедов писать на темы такого рода отдельные книги (отдельные по той причине, что при контактной точечной сварке металл подвергается не просто термической обработке, а электромагнитнотермомеханической). Современные технологические циклы нагрева контакта и плавления ядра идут с такими скоростями, для которых недействительны никакие физические и механические константы, полученные в давних печных экспериментах с их медленными температурными изменениями. Мало того, печной нагрев свободен от тех воздействий на кристаллическую структуру, которые вносит электрический ток и магнитное поле больших концентраций. Для многих современных сварных конструкций и период остывания расплавленного ядра проводится как весьма скоростной опять-таки электротермомеханический процесс. В настоящее время при сварке деталей, да еще из разнородных металлов, сварщик-технолог далеко не всегда сможет обходиться с помощью классического металловедения, не прибегая к вычислениям с помощью ЭВМ. В связи с этим в данном параграфе рассмотрим только главные принципы создания разнотолщинных соединений из разнородных металлов. При сварке деталей из одного и того же металла при отношении толщины $H/h \geqslant 3$ начинает заметно сказываться смещение ядра (рис. 4.3, *а*) в глубину толстой детали. Если рассматривать именно такой случай, то вполне достоверна тепловая схема. Рассчитанные выше соотношения тепловых потерь и теплосодержания дают основание пренебречь последним слагаемым и оперировать только с потерями теплоты (для выяснения причины смещения ядра). Полагая, что тепловые потери в электроды $q_э$ будут одинаковы для обеих деталей, можно учитывать только потери теплоты от пло-

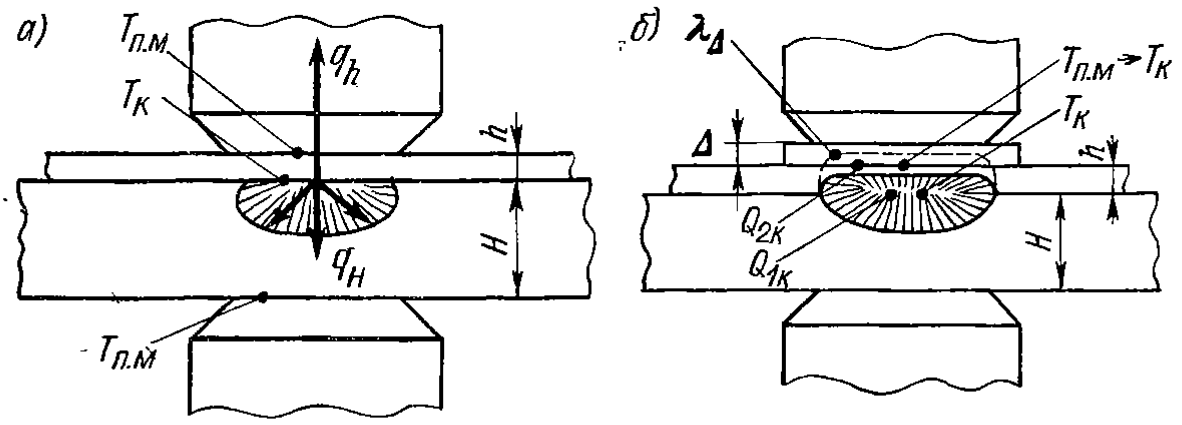


Рис. 4.3. Тепловые потоки в зоне точечной сварки деталей неравной толщины и обозначение температур в плоскостях контактирования

скости свариваемого контакта. Тогда, согласно рис. 4.3, для тонкой детали

$$q_h = \lambda_h \frac{T_к - T_{п.м}}{h} \frac{\pi d^2}{4} t, \tag{4.4}$$

для толстой детали, если $h/H < 1/3$,

$$q_H = \lambda_H T_к \, dt. \tag{4.5}$$

Их соотношение определится так:

$$q_h \approx q_H \frac{3\lambda_h d}{8\lambda_H h} \left(1 - \frac{T_{п.м}}{T_к}\right). \tag{4.6}$$

Отсюда можно делать основные технологические выводы для сварки разнотолщинных деталей.

Случай 1. Детали разной толщины из одного и того же металла, т. е. $\lambda_h = \lambda_H$. Полагая температуры поверхности металла под электродами одинаковыми, выясним, какое соотношение диаметра d и толщины h более выгодно.

При $d \approx 8h$ тепловые потери в сторону тонкой детали велики: в 3 раза больше, чем в ту сторону, где толстая, $q_h = 3q_H$. Следовательно, смещение ядра максимально.

При $d = h$, т. е. при малом диаметре, $q_h = 3/8 q_H$, что обеспечивает нормальный провар и тонкой детали. Вывод отсюда — в пользу возможно малого диаметра ядра. В частности, очень рационален рельеф на тонкой детали.

Случай 2. Разнотолщинные детали из разных металлов. Этот вариант технологически наиболее сложный. Здесь кроме отношения d/h будем иметь значения теплопроводности. В связи с этим следует иметь в виду такие приблизительные соотношения коэффициентов теплопроводности:

$$\frac{\text{Медь}}{\text{Ст3}} = 8; \quad \frac{\text{Латунь}}{\text{Ст3}} = 4{,}75; \quad \frac{\text{Никель}}{\text{Ст3}} = 1{,}5;$$

$$\frac{\text{Медь}}{\text{Никель}} = 5{,}6; \quad \frac{\text{Дюралюминий}}{\text{Ст3}} = 5;$$

$$\frac{\text{Дюралюминий}}{\text{Корозионно-стойкая сталь}} = 8{,}4; \quad \frac{\text{Коррозионно-стойкая сталь}}{\text{Ст3}} = 0{,}6.$$

Из этих соотношений видно, что нужно различать, какой именно металл тонкий и какой толстый. Так, сочетание со стороны электрода тонкого стального листа с толстым латунным может обеспечивать хорошую свариваемость. Обратное сочетание весьма затрудняет сварку. Здесь открываются весьма большие возможности теплового регулирования посредством дополнительных прокладок. Обратимся к формуле (4.6). Она говорит о том, что проваривание тонкой пластины, прилегающей к электроду, будет тем лучше, чем меньшими через нее q_h будут потери в электрод.

Если учесть, что отношение диаметра электрода к толщине d/h обычно составляет 3—5, то при сварке однородных металлов, когда $\lambda_h = \lambda_H$,

$$q_h = q_H \left(\frac{9}{8} \div \frac{15}{8}\right)\left(1 - \frac{T_{\text{п. м}}}{T_{\text{к}}}\right). \qquad (4.7)$$

Отсюда видно, что если сделать $T_{\text{п. м}}$ близкой или даже равной $T_{\text{к}}$, то тепловые потери q_h можно если не устранить, то значительно снизить. Такой эффект достигается способом дополнительных прокладок под электрод (рис. 4.3, *б*). Прокладки Δ могут быть самыми различными и по материалу, и по толщине. Достаточно, например, расположить под электродом тонкую стальную фольгу или фольгу из коррозионно-стойкой стали, как разнотолщинные пластины из дюралюминия будут свариваться с хорошим проваром тонкого листа. В этом случае не только $T_{\text{п. м}}$ становится близкой к $T_{\text{к}}$, но фольга сама по себе оказывается дополнительным очагом тепловыделения, препятствующим стоку теплоты в сторону электрода.

Во многих случаях используют прокладки из того же самого металла, что и тонкая привариваемая пластина. Здесь сильнее сказывается уже не увеличение температуры $T_{\text{п. м}}$, а введение тормозного источника теплоты $Q_{2\text{к}}$, равного, а иногда даже большего по мощности, чем основной $Q_{1\text{к}}$. Такой технологический прием обеспечивает даже приваривание прокладки (см. штриховую линию на рис. 4.3, *б*), которую удаляют по готовности всей конструкции.

Приведенные выше соотношения коэффициентов теплопроводности показывают, что при сварке металлов с мало разнящимися, низкими величинами теплопроводности (например, коррозионностойкие стали и титановые сплавы) безразлично, какой именно элемент соединения тонкий и какой толстый. В этом случае сваривание хорошо идет и при значительной разнотолщинности. К сожалению, однако, для контакта разнородных металлов надо иметь в виду еще и особый чисто физический эффект возникновения термоэлектродвижущих сил в контакте разнородных металлов и сплавов. Здесь речь должна идти об особом полярном электротепловом эффекте.

В 1835 г., вскоре после того как независимо друг от друга Д. Джоуль и Э. Х. Ленц открыли явление электронагрева, парижский часовщик Р. Пельтье, повторяя опыты Джоуля — Ленца для разнородных металлов, установил, по его мнению, некоторые количественные расхождения действительного тепловыделения с тем, какое определяется формулой I^2Rt.

Для проверки этих якобы нарушений закона I^2Rt Э. Х. Ленц поставил выдающийся уникальный эксперимент, удивительный не только для того времени, но и необычайно эффективный сейчас. По плоскости контакта деталей из сплава висмута со сплавом сурьмы высверливалось углубление, достаточное для

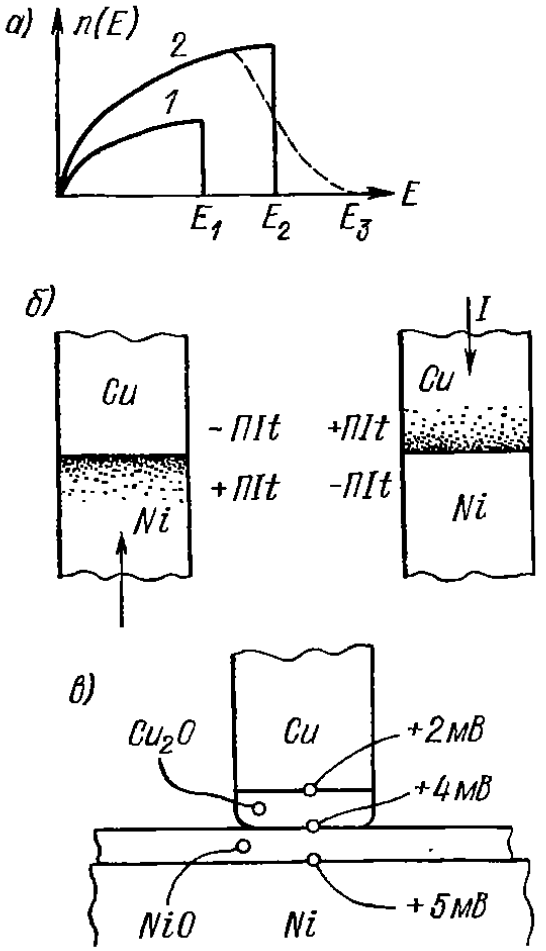


Рис. 4.4. Действие эффекта Пельтье при точечной сварке разнородных металлов

вмещения в него капли воды. При одном направлении постоянного тока через контакт эта капля воды испарялась, при обратном — замерзала. Если и сейчас, когда мы умеем объяснить этот эффект, он производит на зрителей сильное впечатление, то в то время опыт Э. Х. Ленца являлся совершенно ошеломляющим. Э. Х. Ленц этим опытом доказал, что кроме теплоты I^2Rt существует еще полярная теплота $\mp\Pi It$, которую он и назвал именем Р. Пельтье.

В дальнейшем открытие Р. Пельтье, доказанное Э. Х. Ленцем, получало все большее использование, в том числе как общеизвестный эффект термоэлектродвижущих сил или контактной разности потенциалов.

На сегодня, как это уже отмечалось выше, даже структурная разница относительно какой-то границы одного и того же металла создает контактную разность потенциалов. Эта разность весьма заметна на границе твердого и расплавленного металлов, на границах скопления дислокаций и точечных дефектов с объемом структурно стабилизированного металла. Контактная разность потенциалов любых структурно- и физико-химически разнородных веществ при нагреве контакта создает термоэлектродвижущую силу. Поскольку термо-ЭДС полярна, то плоскость контакта оказывается зоной или суммирования, или вычитания термо-ЭДС из величины падения напряжения на контакте от действия внешнего тока, проходящего через контакт. В проводнике контакт разноструктурных объемов является концентратором полярных сопротивлений, служит электронно-дырочным переходом. Эффекты проявления полярных сопротивлений и, соответственно, полярных тепловыделений можно объяснять поведением свободных электронов.

На рис. 4.4, *а* представлены типовые энергетические характеристики свободных электронов. Здесь кривая *1* показывает распределение свободных электронов по их энергиям для одного из металлов, а кривая *2* — для другого при температуре, близкой к абсолютному нулю. Энергии E_1 и E_2 называют граничной, предельной энергией, или энергией Ферми. Контакт двух объемов разных веществ с энергией E_1 и E_2 создает условия для энергетического выравнивания, т. е. перемещения части более активиро-

ванных электронов через плоскость контакта и переноса части энергии через эту границу. Если группу электронов одного и того же вещества активировать любым видом энергии (тепловой, механической и т. д.), то, как это показано штриховой линией для кривой *2* рис. 4.4, некоторая доля свободных электронов приобретет избыточную энергию $E_3 - E_2$. Активируя, таким образом, какой-то объем одного и того же вещества, мы создаем энергетическое неравновесие у границы исходного и активированного веществ. Этот эффект обсуждался в гл. 1. Сейчас представляет интерес рассмотреть контактирование разнородных материалов, особенно таких контрастных, как, например, медь и никель, для которых граничные энергии весьма различны. Для такого контакта, если его нагревать током I (рис. 4.4, *б*), общее тепловыделение в зоне контакта будет определяться суммарно теплотой Джоуля и Пельтье, т. е.

$$Q = I^2Rt \mp \Pi It. \qquad (4.8)$$

В зависимости от направления тока теплота Пельтье будет или понижать температуру по какую-то сторону плоскости контакта, или повышать ее против того значения, какое обеспечивает теплота Джоуля. Оценивать относительную роль теплоты Пельтье для различных контактов можно посредством показателей термоэлектродвижущей силы, поскольку

$$\Pi = \alpha\theta, \qquad (4.9)$$

где α — в мкВ, отнесенных к абсолютной температуре. Так, в частности, для контактов медь + никель $\alpha = +24$; медь + + сплав константан $\alpha = +42$; направление термотоков — от меди к никелю и константану. В связи с этим на схеме рис. 4.4, *б* при указанных на нем направлениях внешнего тока I охлаждающее действие эффекта Пельтье будет проявляться на левой модели в меди и на правой — в никеле. Особенно контрастны картины термо-ЭДС на границах металлов и оксидов. На рис. 4.4, *в* показано реальное контактирование медного электрода с никелевой пластиной. Размеры оксидных слоев масштабно весьма преувеличены, но значения термо-ЭДС в милливольтах даны действительные при температуре контакта 1000 К. Суммарная термо-ЭДС может составлять ∓ 20 % от падения напряжения на контакте за счет сварочного тока. Этот эффект и обусловливает различное проплавление деталей в зависимости от направления сварочного униполярного тока для разнородных металлов, если они несут на себе еще соответствующие оксидные наслоения. Что же касается оксидных наслоений на электродах, то они практически всегда действуют как микротермогенераторы, так как никто и никогда не зачищает электроды после каждой точки.

Вообще технологам следует иметь в виду особую роль или естественных, или даже искусственно наносимых наслоений как на свариваемые детали, так и на наконечники электродов. Твор-

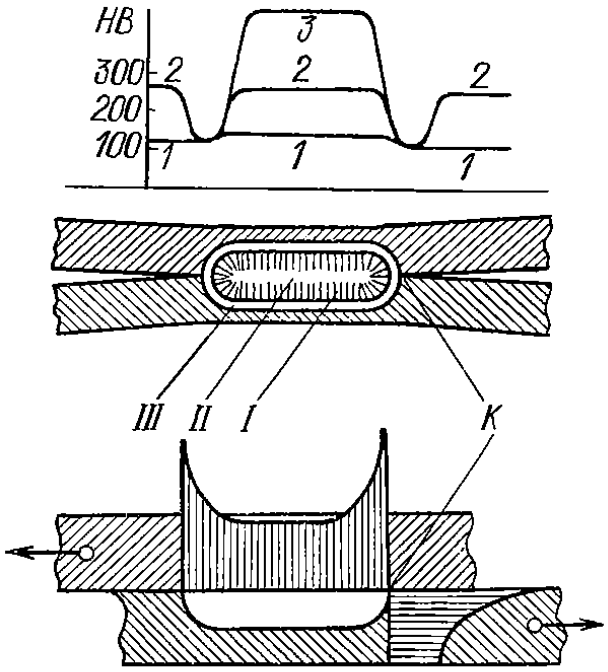


Рис. 4.5. Возможные распределения твердости в зоне точечно-сварного соединения, схема строения ядра и концентрация напряжений вокруг него:

I — столбчатые дендриты; *II* — мелкие разориентированные зерна; *III* — зона термического влияния

ческие возможности здесь не ограничены ничем. Наибольший успех ожидает технологов, вероятно, тогда, когда искусственные покрытия электродных наконечников по своей стабильности и стойкости приблизятся к стойкости естественных оксидов.

Недооценка эффекта Пельтье неоднократно имела место в условиях производства, в частности при сварке никелевых сплавов с конструкционной сталью, когда сварку производили на конденсаторных машинах, т. е. униполярным током. Для обеспечения стабильного провара в таких случаях следует обеспечивать одинаковое направление сварочного тока. Если же располагать мелкие детали безразлично, создавая через них различное направление тока, то по статистике закономерно непровар наблюдается у половины всех сваренных деталей.

Форма ядра сварной точки, его расположение относительно площади контакта и его размеры — это главные факторы, определяющие прочность единичной сварной точки. Вообще-то трудно себе представить более несовершенную прочностную модель, чем единичная сварная точка. Выше уже отмечалось, что вокруг ядра получается резкая концентрация механических напряжений. Картина таких напряжений изображена на рис. 4.5. Никакие ухищрения посредством термомеханической обработки не могут изменить геометрию конструкции соединения с ее концентраторами в точке *К*. Это значит, что резкость концентрации обязательно сохраняется для любых точечно-сварных соединений из любых металлов. Действие концентрированных напряжений может быть несколько смягчено созданием пластического металла по кольцу концентрации или, наоборот, усилено сохранением послесварочной закаленной структуры. На рис. 4.5 даны типовые графики ядра и зоны термического влияния вокруг него. Сохранение одинаковой твердости ядра и зоны термического влияния (примерно по кривой *1—1—1*) свойственно коррозионно-стойким аустенитным хромоникелевым сталям. Твердость по кривой *2—2—2* характерна для незакаливающихся металлов и сплавов, упрочненных холодной деформацией. В этом случае в зоне термического влияния происходит операция отжига, которая завершается снижением показателей твердости. Кривые *1—3—1* или *1—2—1*

относятся к легированным металлам, способным принимать резкую (*1—3—1*) или умеренную (*1—2—1*) закалку.

Все эти кривые твердости показаны как типовые для сварных соединений, не подвергнутых после выключения сварочного тока каким-либо термомеханическим операциям. Операции такого рода, следующие непосредственно в том же цикле сварки, способны обеспечивать все современные точечные машины. Структура самого ядра как типовая была представлена на рис. 4.2. Кристаллизация по схеме нижней части рис. 4.2, *а*, когда столбчатые дендриты непосредственно стыкуются друг с другом по плоскости контакта, характерна для металлов и сплавов, обладающих малым интервалом температур кристаллизации. Сюда относятся многие высоколегированные, жаропрочные и коррозионностойкие стали, а также сплавы титана, циркония и магниевые.

Сплавы алюминия обладают относительно большим пределом температур кристаллизации. Для них в средней зоне ядра характерен переход столбчатых кристаллов в мелкозернистые разориентированные (верхняя схема на рис. 4.2, *а*). Для ядра и его структуры следует еще раз подчеркнуть главное: важны его размеры, но не структура. В ядре сварной точки стальных деталей допускаются единичные поры, раковины и даже трещины, если их размер не превышает $^1/_4$—$^1/_3$ высоты ядра. Такого рода дефекты не оказывают заметного влияния не только на статическую, но даже и на вибрационную прочность. Вот насколько сильно для точечно-сварного соединения сказываются концентрации напряжений вокруг ядра. Именно они и определяют прочностную картину в целом. В связи с этим значительно больший интерес вызывает структура зоны термического влияния вокруг ядра, а не структура ядра. Структура зоны термического влияния управляется и регулируется посредством электротермомеханических операций, которые осуществляются непосредственно после кристаллизации ядра. Эти операции вписываются в общую программу сварочного цикла и должны быть рассмотрены отдельно, с некоторыми подробностями.

4.2. Технологические циклы точечной сварки

Главным и самым ответственным моментом в формировании ядра сварной точки является первая операция — нагрев. Наиболее отчетливую связь основных переменных, обусловливающих начальный процесс нагрева свариваемого контакта, дает формула (2.79).

Как видно, главными переменными являются: плотность тока i, начальное электрическое сопротивление контакта шероховатых поверхностей $r_{мг0}$, сопротивление оксидных наслоений $r_{пл0}$ и n — показатель формы кривой сварочного тока. Для первого момента включения тока можно считать, что расплавленный диск из двух слоев пирамидальных шероховатостей образуется в результате

расплавления слоя деформированных микропирамид проходящим током:

$$\frac{I^2\rho_т 2\Delta}{S}dt = \gamma c S 2\Delta\, d\theta, \qquad (4.10)$$

отсюда

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{I^2\rho_т}{\gamma c}.$$

Подставляя это значение в формулу (2.79), находим

$$\frac{r_{мг\,0} + r_{пл\,0}}{r_т} - 0{,}5 = n. \qquad (4.11)$$

В современной производственной практике поверхности свариваемых деталей общепринято зачищать до металлического блеска, если детали покрыты слоем окалины. Детали из холодного проката уже в состоянии поставки свободны от видимых оксидных наслоений. Для таких нормальных условий можно считать $r_{пл0} = 0$ и, как было показано на рис. 1.26 и 1.27, начальное сопротивление холодного контакта оказывается весьма близким к сопротивлению горячей сваренной точки $r_т$. Поскольку $R_{кт0} \approx r_{мг0} + r_{пл0} \approx \approx r_т$, то согласно равенству (4.11) показатель формы кривой тока должен быть близок к $n = 1/2$.

Можно убедиться, что этот показатель довольно точно определяет кривую неискаженной синусоиды в пределах 0—90°. Отсюда видно, что для сварки нормальным переменным током действительно необходима зачистка деталей до металлического блеска. Но, как это бывает и как это показано на рис. 1.26, оксидные пленки способны увеличить, например, вдвое начальное значение $r_{мг0} + r_{пл0} \approx 2r_т$. Для того чтобы диск получился расплавленным, а не кипящим с выплеском этого кипящего слоя, из равенства (4.11) следует, что форма кривой сварочного тока должна быть не выпуклой ($n = 1/2$), а вогнутой приблизительно с показателем кривизны $n = 3/2$.

В настоящее время созданы отдельные экземпляры точечных машин, которые способны от точки к точке автоматически менять показатель n формы кривой сварочного тока, в зависимости от состояния контактирующих поверхностей. Однако малое распространение такого рода машин пока вполне правомерно, поскольку автоматика очень сложная, машины дорогие и недостаточно себя оправдывают тем, что создают весьма стабильные размеры ядра.

Геометрия единичного точечно-сварного соединения из-за концентрации напряжений лишает ядро почти всех его структурных и даже, в известных границах, размерных преимуществ. Тем не менее, за последние 20 лет созданы целые серии уже теперь обычных и стандартных машин с регулируемыми формами кривых сварочного тока. На рис. 4.6 представлена серия такого рода кривых, хотя и не в полном современном ассортименте. На

рис. 4.6, *а* показана форма кривой нормального переменного тока и кривая подъема температуры T по плоскости свариваемого контакта. Это самая простейшая и наиболее распространенная форма кривой сварочного тока, предназначенная для сварки деталей из обычной низкоуглеродистой стали толщиной 0,5— 2 мм при условии хорошей зачистки контактных поверхностей. Для такой же стали, но бóльших толщин (3—6 мм), тщательная зачистка которой не всегда может быть обеспечена, очень полезна модулированная кривая тока, показанная на рис. 4.6, *б*. Для стальных деталей большой толщины (до 15—20 мм) следует рекомендовать кривую тока, приведенную на рис. 4.6, *в*. Здесь начальный период нагрева идет при относительно меньшей силе тока, чем процесс окончательного сваривания. Как амплитуда токов $I_{пд}$ и $I_{св}$, так и время $t_{пд}$ и $t_{св}$ могут регулироваться в самых широких пределах. Прерывистое включение тока, показанное на рис. 4.6, *г*, весьма эффективно при сварке плохо зачищенных или даже совсем незачищенных деталей большой толщины. Такая система нагрева очень хороша и для зачищенных деталей, но больших габаритных размеров (например, балок, ферм), когда конструктивная жесткость затрудняет немедленное надежное контактирование в зоне сварного соединения. Последующие кривые сварочных токов (рис. 4.6, *д*—*и*) относятся к униполярным, конденсаторным машинам, а два последних — к машинам с выпрямлением вторичного тока. Для импульсных машин (рис. 4.6, *е*, *з* и *к*) также используется принцип подачи первого подогревающего импульса и второго сваривающего.

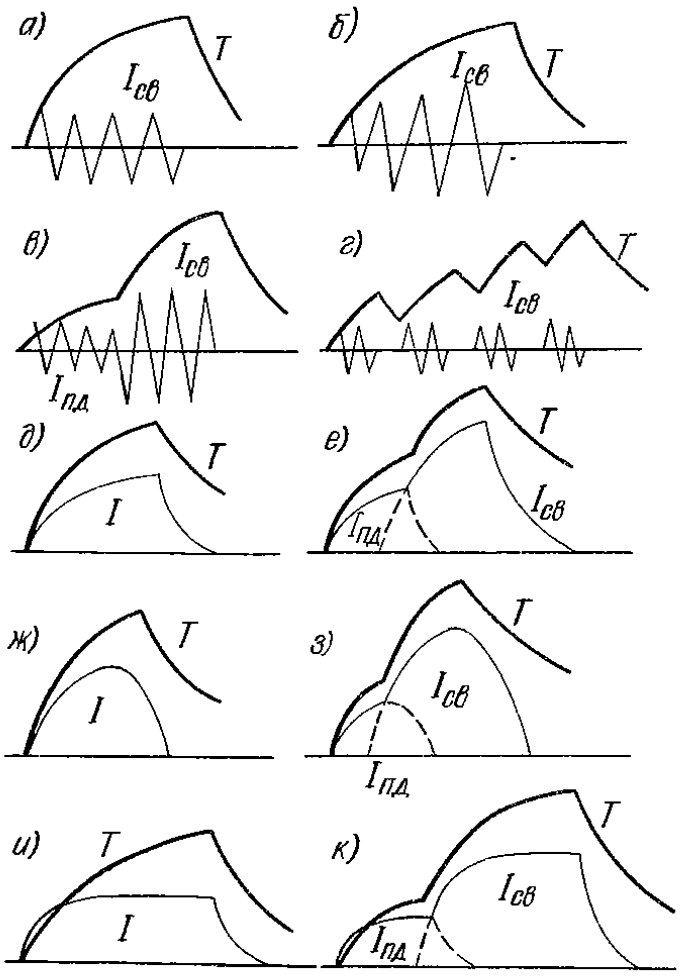


Рис. 4.6. Рост температуры в зависимости от формы кривых тока подогрева деталей ($I_{пд}$) и сварочного тока, формирующих расплавленное ядро ($I_{св}$) для машин переменного тока, униполярных, конденсаторных и выпрямленного вторичного тока

Завершающим этапом термического цикла точечной сварки является кристаллизация ядра и формирование структуры зоны термического влияния. Эти операции уже могут быть не только термическими, но и термомеханическими. Рассмотрим для примера

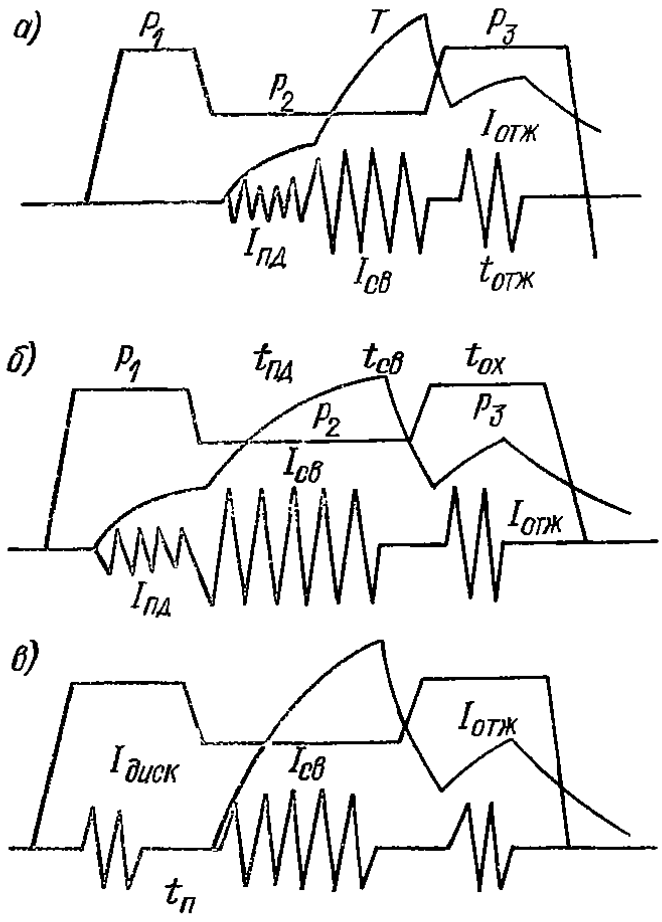


Рис. 4.7. Некоторые типовые циклы точечной сварки

некоторые полные циклы сварочного процесса с программированием давления, токов подогрева и отжига.

Цикл по рис. 4.7, *а* начинается с того, что электроды сжимают детали силой P_1, в 1,5—2 раза большей, чем это предусматривается режимом сварки. Такого рода предварительное обжатие деталей весьма желательно при сварке уже не мелких, а крупногабаритных или даже тяжелых конструкций, которые обладают некоторой собственной конструктивной упругостью или жесткостью. Через некоторый момент времени повышенное давление уменьшается до режимного, сварочного P_2 и в этот же момент включается ток подогрева контакта $I_{пд}$, переходящий затем в сварочный ток $I_{св}$, в 1,5—2 раза больший, чем подогревающий. Если свариваемые детали оказались способными принять нежелательную сильную закалку, ее снимают отжигающим током $I_{отж}$. При таком цикле переменными являются не только амплитуды или действующие значения токов, но и все параметры времени $t_{пд}$, $t_{св}$, $t_{ох}$, $t_{отж}$. В некоторых случаях, при недостаточной зачистке деталей, ток подогрева полезно сдвигать в область действия начального повышенного давления (рис. 4.7, *б*). Наиболее легко осуществим на машинах, даже с весьма простым регулированием режима, очень эффективный цикл, предложенный А. П. Рукосуевым (Красноярский политехнический институт). Этот цикл (рис. 4.7, *в*) хорош для тяжелых конструкций, для плохой зачистки деталей, для легированных сталей больших толщин. Принципиальная сущность цикла сводится к следующему: как только детали сжаты начальным повышенным давлением, на электроды подается импульс тока $I_{диск}$, по амплитуде и времени действия достаточный только для того, чтобы по плоскости свариваемого контакта образовался горячий (лучше расплавленный) диск из тех пирамидальных или иной формы шероховатостей, которые характеризуют составляющую контактного сопротивления

$$r_{мр\,0} = 2\rho_\Delta \Delta / A_c.$$

Горячий диск уже имеет сопротивление

$$r_{\text{диск}} = \rho_{\text{т}} h / A_{\text{с}}.$$

Равенство этих сопротивлений говорит о том, что высота расплавленного диска независимо от способа обработки поверхностей получается приблизительно одинаковой. Если, например, для стальных деталей, зачищенных наждачным кругом, $\rho_{\Delta} =$ $= 1000$ мкОм·см, а высота пирамиды $\Delta = 60$ мкм, то для холодного проката (почти полированная поверхность) $\rho_{\Delta} =$ $= 60\,000$ мкОм·см, $\Delta = 1$ мкм. Физический смысл цикла, данного на рис. 4.7, *в*, сводится к тому, что первый импульс тока, образующий этот диск расплава, ликвидирует, по сути дела, самую нестабильную составляющую $r_{\text{мг}}$ [см. формулу (1.77)] полного сопротивления $R_{\text{кг}}$. Последующий сварочный ток действует уже на геометрическую составляющую $r_{\text{гт}}$, значение которой достаточно стабильно.

В современной практике изготовления сварных конструкций балок и ферм стали использовать контактную точечную сварку прокатных профилей большой толщины — от 6 до 30 мм. Операции зачистки такого проката весьма усложняют технологию в целом. Однако оказалось возможным разработать особый цикл точечной сварки деталей большой толщины без их зачистки от окалины. Вместо такой отдельной операции используется эффект электрического пробоя слоя окалины непосредственно в электродах точечной машины. Такой цикл, однако, требует от точечной машины особых электрических характеристик. Машина должна обеспечивать для пробоя окалины относительно повышенное напряжение на электродах и нормальную промышленную частоту тока (рис. 4.8). Действующее значение пробойного тока от тока, сваривающего единичную точку, принимают в пределах

$$I_{\text{ок}} = (0{,}35 \div 0{,}45)\, I_{\text{св}}.$$

Вслед за пробоем слоя окалины идет этап подогрева током

$$I_{\text{пд}} = (0{,}55 \div 0{,}8)\, I_{\text{св}}.$$

Затем следует собственно формирование ядра при значениях сварочного тока на 35—40 % выше тех, какие оказываются оптимальными при сварке без подогрева. Токи операции отжига составляют $(0{,}45 \div 0{,}70)\, I_{\text{св}}$. Время каждого отдельного этапа по сравнению с временем сварки единичной точки принимается таким:

Для разрушения окалины	0,5—0,8
» подогрева »	0,6—0,75
» охлаждения »	0,5—0,7
» отжига »	0,5—0,55

Если приходится ставить не единичные, а групповые точки, то для второй точки вторичный ток следует увеличивать на 15—

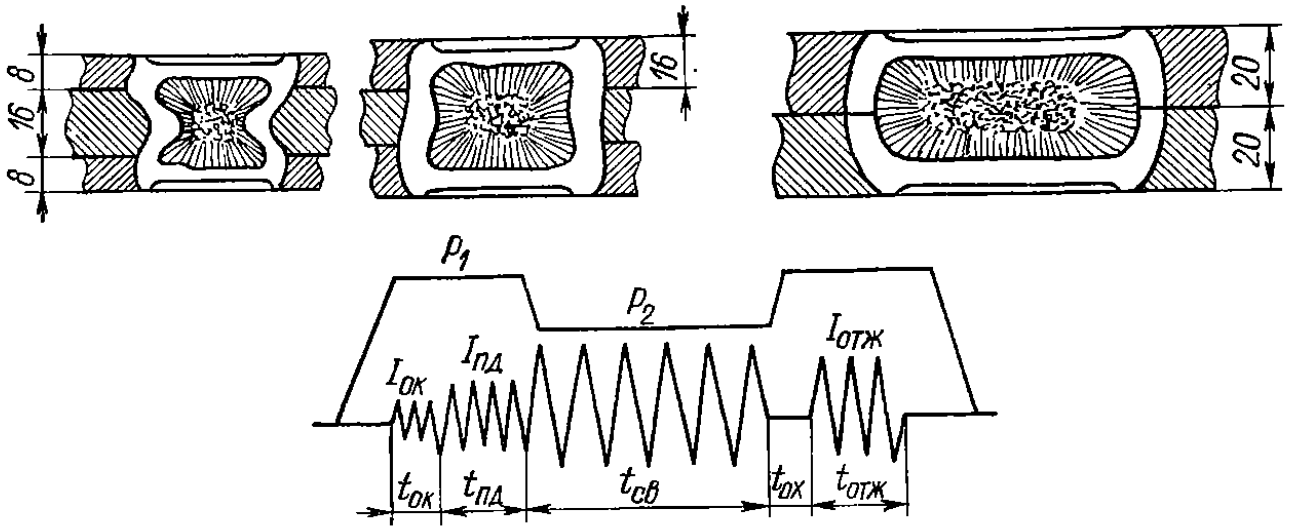


Рис. 4.8. Типовая структура точечно-сварных соединеиий больших толщии и типовой цикл сварки для них

20 %. К сожалению, опыт Института электросварки по изготовлению точечно-сварных тяжелых конструкций пока что получил весьма ограниченное развитие. Для такого рода технологии необходимы специализированные машины больших мощностей (1000—1500 кВт), способные выдавать как вторичные токи нормальной частоты (для пробоя окалины), так и низкочастотные (для подогрева, сварки, отжига). На рис. 4.8 показаны схемы типовых точечно-сварных соединений толстых листов. Наиболее характерной для них является зернистая структура центра ядра с относительно увеличенным размером зерен по сравнению с теми разориентированными в слое дендритами, которые типичны для однократного включения тока. Ток отжига делает свое дело.

Несколько слов о завершающих этапах сварочного цикла, термомеханической обработке сформированного ядра и зоны термического влияния.

Рецептурные рекомендации здесь невозможны, и если к ним прибегают в отдельных книгах, то это всегда только частные случаи, лишенные теоретических обобщений. Если иметь в виду огромное разнообразие сталей и сплавов, из которых приходится изготавливать современные точечно-сварные конструкции, то следует сделать твердый вывод о невозможности расчетно-теоретических обобщений по подбору температурных кривых нагрева и охлаждения, какие могут быть получены в циклах, приведенных на рис. 4.6 и 4.7.

Современная наука о металловедении все же основана на печных экспериментах, когда нагрев обеспечивался в печах, а охлаждение — в жидких средах. Для электрической контактной точечной сварки все нагревы идут за счет токов весьма большой плотности, в магнитных полях высокой концентрации. Такие нагревы по самой их природе ничего общего с печными нагревами не имеют. Охлаждение зоны термического влияния происходит не теплоотдачей в жидкую среду, а теплопроводностью сварива-

емому металлу и электродам. Скорости охлаждения оказываются иногда такими, для классических металловедов неслыханными, какие и создают неслыханные структуры. Вполне понятно, что до сих пор никаких надежных теоретических обобщений по термомеханическим операциям для сварной точки не могло быть создано, да и не следует пытаться их создавать без электронно-вычислительной техники. В условиях современной практики точная отработка сварочного цикла по любой из схем рис. 4.6 и 4.7 должна обеспечиваться экспериментально, и этот путь оказывается самым целесообразным. Даже для самой грандиозной по размерам точечно-сварной конструкции эксперимент для единичных точек никогда не составляет затруднений. Надо только не нарушать для отдельных точек на образцах те плотности токов и магнитных полей, какие будут характерны для конструкции в целом. Для того чтобы окончательно убедить читателя в невозможности теоретических расчетов скоростей охлаждения с помощью обычного математического аппарата теории теплопроводности, следует привести некоторые дополнительные опытные материалы. При сварке стальных листов толщиной 4 + 4 мм измерялась температура поверхности металла непосредственно под электродом по его оси $T_{пэ}$ и на расстоянии приблизительно 1 мм от края электрода. В опыте моделировались условия сварки: лабораторные, когда ставят точки посредством свежезачищенных электродов (рис. 4.9, *а*), и производственные, когда электроды несмотря на все инструкции зачищают редко и плохо (рис. 4.9, *б*). В последнем случае электроды были взяты в цехе; их конец был деформирован и покрыт слоем оксида, крепко связанным с материалом электрода. Температурные кривые рис. 4.9, построенные по трем очень характерным точкам, показывают: *1—1* — момент выключения сварочного тока, *2—2* — приблизительно через 1 с после этого момента. Сравнивая друг с другом кривые рис. 4.9, *а*, можем сделать вывод о возможных, но мало кому из технологов известных и не совсем обычных распределениях температуры при сварке точки. Если соблюдаются все условия охлаждения

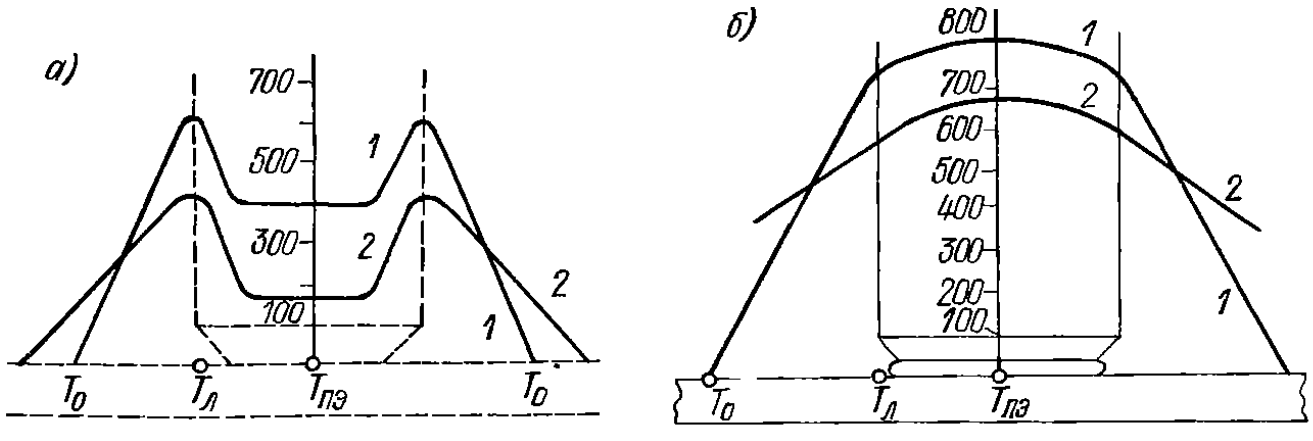


Рис. 4.9. Распределение температуры на поверхности свариваемых пластин (T_0 — температура массы металла детали)

электродов, геометрия и чистота контактной поверхности, то электроды служат сильнейшим охладителем. Температуры $T_{пз}$ и $T_л$ (рис. 4.9, *а*) показывают, что заметно более высокая температура в момент окончания нагрева создается не под электродом, а рядом с ним. Мало того, если электрод не снимается с металла быстрее, чем через секунду, то, как показывает кривая *2—2*, металл под электродом охлаждается с большей скоростью, чем рядом в точке $T_л$. Однако совсем другая картина получается при достаточно заношенном электроде (рис. 4.9, *б*). В этом случае его охлаждающая способность резко снижается как в процессе нагрева (кривые *1—1*), так и при охлаждении (кривая *2—2*). Сравнивая эти опытные температурные кривые, можно сделать заключение, что в циклах точечной сварки следует обращать внимание на промежуток времени между выключением тока и съемом давления, т. е. удалением электродов с поверхности горячего металла. Это особенно относится к тем случаям, когда свариваемая конструкция обладает собственной жесткостью и упругость ее волнистых поверхностей способна немедленно, вслед за отъемом электродов, разорвать еще горячее сварное соединение.

Таким образом, следует сделать общий вывод об абсолютной полезности цикла давления с окончательной проковочной операцией. Однако естественная в таких случаях задержка электродов на горячей поверхности металла, с точки зрения его охлаждения, как об этом свидетельствуют кривые, приведенные на рис. 4.9, может быть самой разнообразной, в зависимости от свойств электродов. А эти свойства бывают очень различны. Кривые рис. 4.9 дают частную картину для медных электродов, однако они могут быть и из других медных и немедных сплавов. Следовательно, вряд ли можно говорить вообще о возможности рассчитать скорости охлаждения и, соответственно, структуры точечно-сварных соединений. Подлинные структурные картины следует устанавливать экспериментально, с соблюдением реальных цеховых, а не идеальных лабораторных условий.

4.3. Расчет режимов точечной и рельефной сварки

В производственной и проектной практике для контактной точечной сварки приходится решать несколько типовых конструктивно-технологических задач.

Первая из них возникает перед технологами и конструкторами при необходимости закупать новые машины, выбирая их из существующих стандартных или составляя технические задания на изготовление новых специализированных машин. Такая задача решается при известных:

1) конструкциях свариваемых деталей, узлов или изделий в целом, со всеми размерами;

2) металле, из которого создаются сварные соединения, со всеми физическими и механическими его свойствами.

Это основные исходные данные для будущих расчетов. Кроме того, необходимо считаться с целым рядом других обстоятельств: требуемой прочностью соединений, производительностью и т. д.

Весь предшествующий теоретический материал показывает, что для назначения режима сварки единичной точки главным размером является толщина свариваемых деталей δ. Согласно ГОСТ 15878—79, по толщине может быть выбран размер ядра, т. е. его диаметр $d_т$ и высота h. От этих размеров (δ, $d_т$, h) начинаются все технологические расчеты. В современной сварочной литературе сконцентрировано огромное число таблиц [19], в которых рекомендованы для определенных диаметров точек сварочные токи, время их пропускания и давление электродов. Если проектируется технология точечной сварки именно для такого металла и размеров ядра, какие есть в таблицах, то, разумеется, нет никакой надобности вести расчеты токов и давлений. Надо просто ориентироваться на тот огромный опыт, по которому созданы режимные таблицы [19]. Мало того, в некоторых производственных условиях для какого-то металла и его размеров установлены собственные режимные характеристики, отличающиеся от литературных рекомендаций. Но если же речь идет о новом или вообще другом металле (если приходится ориентироваться на другие размеры, явно не вписывающиеся в существующие табличные), то расчеты производить необходимо. Обратимся к формулам (2.79) и (2.84). Последняя представляет критерий технологического подобия

$$К = \frac{I^2 \rho_т h \sqrt{t}\, \sigma_т}{d_т T_{пл} \sqrt{\lambda \gamma c}\, \delta P}, \qquad (4.12)$$

пригодный для диаметров точки от 3 до 40 мм.

Для импульсных режимов сварки униполярными токами из формулы (2.79) получается еще один критерий технологического подобия:

$$И = \frac{i^2 \rho_т \tau_i}{\gamma c T_{пл}} \frac{r_{мг\,0} + r_{пл\,0}}{r_т} \frac{1}{2n+1}. \qquad (4.13)$$

Первый критерий (К) содержит 10 переменных, второй (И) — восемь. Как видно, ни в какую таблицу столько переменных не вместить и, самое существенное, по таблице не понять взаимосвязь всех переменных друг с другом, в том числе их степенную связь. Но не следует и преувеличивать достоинство критериальных методов расчета. Процесс точечной сварки настолько сложен, что динамику процесса полностью не отображают и критерии К и И со всеми их переменными.

Ценность критериальных методов расчета для сегодняшней практики в том, что по хорошо отработанным режимам, известным из опытных данных, можно с достаточной инженерной точностью найти режимы сварки для неизвестных металлов и неизвестных размеров свариваемых деталей. Критерий К предназначен для

расчета режимов точечной сварки двух листов одинаковой толщины при условии хорошей зачистки свариваемых поверхностей (оксидные пленки электрически и оптически прозрачны). Критерий И, предназначенный для импульсных режимов, не столько расчетный, сколько познавательный. В нем содержится несколько трудноопределяемых величин. В частности, согласно формуле (1.79),

$$r_{\text{мг}\,0} = \frac{(1 \div 2)\,\rho_\Delta \Delta}{3A_c},$$

где

$$\rho_\Delta = \rho_0 \left[(1 + kT) + \frac{a}{\Delta} e^{\sigma/\sigma_T} \right].$$

Высоту микропирамиды Δ и размер ее основания a выбирают по данным табл. 5 приложения. Контурную площадь контакта считают, с некоторым преувеличением, равной $\pi d_т^2/4$. Сопротивление ядра в расплавленном состоянии $r_т$ определяют так:

$$r_т = 4\rho_т h/(\pi d_т^2).$$

Степенной показатель n для кривой тока [см. формулу (2.44)] находят по форме реальной или предполагаемой осциллограммы. Сопротивление оксидной пленки расчетным путем определить практически невозможно.

Критерии К и И вполне отчетливо показывают взаимосвязи всех переменных, от которых зависит режим сварки. Однако не все переменные рассчитываются. Некоторые из них задаются. Размеры ядра сварных точек, например, задаются по ГОСТ 15878—79. В нем для каждой толщины свариваемых листов предусмотрен минимальный размер диаметра ядра. Так, в частности, рекомендуется:

Толщиина листа, мм . .	0,3	0,8—1,0	1,8—2,2	2,7—3,2	3,7—4,2	4,7—5,2	5,7—6,0
Диаметр ядра не менее, мм	2,5	4	7	9	12	14	16

Эта рекомендация хорошо вписывается в эмпирическую формулу

$$d_т = 1{,}75 + 2{,}5\delta, \qquad (4.14)$$

где $d_т$ и δ — в мм.

Если диаметр ядра сварной точки задается государственным стандартом, то величины сварочного тока и силы сжатия электродов могут выбираться технологом в некоторых довольно широких пределах.

Рассматривая весь современный опыт применения точечной сварки, можно убедиться, что технологическая практика отработала некоторые границы для величины силы сжатия электродов Так, можно считать, что силы сжатия выбираются в зависимости

от толщины δ свариваемых листов приблизительно в таких пределах:

Материал	Ст3 и низколегированные стали	Латунь	Магниевые сплавы	Алюминиевые сплавы	Коррозионно-стойкие стали	Титан и сплавы
$P \cdot 10$, кН	$(0{,}2 \div 0{,}3)\,\delta$	$(0{,}22 \div 0{,}35)\,\delta$	$(0{,}25 \div 0{,}35)\,\delta$	$(0{,}25 \div 0{,}50)\,\delta$	$(0{,}3 \div 0{,}5)\,\delta$	$(0{,}35 \div 0{,}50)\,\delta$

Большие силы сжатия относят к деталям, при сборке которых предполагается относительно бо́льшая конструкционная жесткость.

Если давление электродов относить к диаметру ядра, то можно говорить об отношении действующего давления p к пределу текучести металла в холодном состоянии $\sigma_{т0}$. В современной практике приняты в среднем такие отношения:

Материал	Ст3	Титан	Дюралюминий	Латунь	Коррозионно-стойкая сталь
$p/\sigma_{т0}$	0,33	0,3	0,25	0,15	0,2

Силы сварочных токов ни назначать, ни выбирать произвольно тоже нельзя. Для них технологическая практика также отработала ограничения. Поскольку минимальный ток определяет наибольшую длительность процесса сварки, то такие режимы токов называют мягкими. Для сталей эта мягкость характеризуется отсутствием резкого закаливания и большими зонами термического влияния. Предельно мягкими режимами тока следует считать те, при которых обеспечиваются минимально требуемые по ГОСТ 15878—79 размеры расплавленного ядра сварной точки.

Жесткие режимы — это предельно возможный максимальный сварочный ток. Этот предел ограничивается не столько размерами расплавленного ядра, сколько опасностью выплеска сильно перегретого жидкого металла из плоскости свариваемого контакта.

Многолетняя технологическая практика установила, что все возможные современные режимы сварочного тока вписываются в соотношение

$$I^2\rho_т/d_т^2 = (14 \div 30)\ \text{кВт/см}.$$

Отсюда получается формула для выбора силы сварочного тока

$$I = (120 \div 170)\, d_т/\sqrt{\rho_т}, \qquad (4.15)$$

где I — в А, $d_т$ — в см, $\rho_т$ — в Ом·см.

Минимальную границу токов по формуле (4.15) переступать не рекомендуется. Максимум может быть превышен при очень хорошей зачистке деталей перед сваркой и по каким-либо причинам, особенно при высоком давлении электродов. Если же предусматривается цикл сварки с подогревом, то максимальный

коэффициент может быть доведен до 230. Поскольку соотношение (4.15) меняется в ограниченных пределах (а оно является одним из главных элементов критерия К), то вполне естественно ожидать, что и критерий К для современных режимов должен лежать в известных границах. Так оно и есть в действительности. Для всех металлов независимо от мягкости или жесткости режима критерий К находится в пределах 25—50 (для циклов с подогревом максимум значения К может достигать 60). Ниже 25 — это недопустимо мягкие режимы, выше 50 — это уже граница выплесков. Критерий К, связывающий для точечной сварки практически все параметры режима и характеристики металла, является критерием технологического подобия. Если это так, то согласно основному принципу подобия процессы подобны, если их критерии одинаковы. Отсюда следует такой практический вывод. Допустим, для каких-либо деталей хорошо отработан оптимальный режим, характеризуемый определенным критериальным числом К. Это же значение К определит такие же оптимальные режимные показатели для любых других деталей, совершенно различающихся и размерами, и характеристикой металла.

Рассмотрим конкретные примеры. Допустим, в некотором производстве был отработан и принят для стали Ст3 толщиной 3 + 3 мм следующий режим сварки: $I = 12$ кА; $P = 75$ кН; $t = 1$ с. При этом режиме обеспечивалось: $d_т = 1{,}05$ см; $h/\delta = 1{,}2$. Принимаем константы металла:

	$\rho_т$, мкОм·см	$\sigma_{то}$, МПа	$T_{пл}\sqrt{\lambda\gamma c}$, Дж/(см^2·°С·с$^{1/2}$)
Для Ст3	140	250	2140
» дюралюминия Д1	10	250	1527
Для латуни	16	230	2340
» титана ОТ4 . .	165	450	1350

Критерий К получается равным:

$$K = \frac{144 \cdot 10^6 \cdot 140 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 1{,}2 \cdot 25000}{1{,}05 \cdot 2140 \cdot 7500} = 36.$$

Как указывалось, это значение характеризует средний режим. Положим в основу последующих расчетов именно это число.

Пример 1. Свариваются детали из стали Ст3 толщиной 0,7 + 0,7 мм.

На основе формулы (4.15) для одного и того же металла

$$12/1{,}05 = I/0{,}35, \quad I = 4 \text{ кА}.$$

Силу сжатия определим по закону пропорциональности, используя формулу (1.10),

$$P/(0{,}35)^2 = 7500/(1{,}05)^2, \quad P = 820 \text{ Н}.$$

По критерию К = 36 находим;

$$36 = \frac{16 \cdot 10^6 \cdot 140 \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}2 \cdot 25\,000 \sqrt{t}}{0{,}35 \cdot 2140 \cdot 820}, \quad t = 0{,}11 \text{ с}.$$

Пример 2. Свариваются детали из титана толщиной 1,5 + 1,5 мм.

Принимаем $d_т = 7$ мм; $h/\delta = 1{,}3$ (для титана характерны большие глубины проплавления):

$$I\sqrt{165}/0{,}7 = 12\,000\sqrt{140}/1{,}05, \quad I = 7{,}4 \text{ кА};$$

$$\frac{P}{(0{,}7)^2\,45\,000} = \frac{7500}{(1{,}05)^2\,25\,000}, \quad P = 6 \text{ кН};$$

$$36 = \frac{54{,}86 \cdot 10^6 \cdot 165 \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}3 \cdot 45\,000 \sqrt{t}}{0{,}7 \cdot 1350 \cdot 6000}, \quad t = 0{,}148 \text{ с}.$$

Пример 3. Свариваются детали из дюралюминия толщиной 8 + 8 мм; $d_т = 25$ мм; $h/\delta = 1{,}2$

$$I = 170 \cdot 2{,}5 \cdot 10^3 \sqrt{10} = 134{,}5 \text{ кА}.$$

Сила тока здесь взята по максимуму. При $P = 25$ кН, К = = 36 $t = 0{,}4$ с.

Пример 4. Свариваются детали из коррозионно-стойкой стали 1Х18Н10Т толщиной 0,5 + 0,5 мм. Для нее $\rho_т$ = = 130 мкОм·см; $\sigma_т = 400$ МПа;

$$T_{пл}\sqrt{\lambda\gamma c} = 1530 \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2 \cdot {}^\circ\text{С} \cdot \text{с}^{1/2}}.$$

Сила сжатия $P = 4000\delta = 2$ кН; $h/\delta = 1{,}2$; $d_т = 3$ мм;

$$I = 140 \cdot 0{,}3/\sqrt{130 \cdot 10^{-6}} = 3{,}68 \text{ кА};$$

$$36 = \frac{13{,}57 \cdot 10^6 \cdot 130 \cdot 10^{-6} \cdot 40\,000 \sqrt{t}}{0{,}3 \cdot 1530 \cdot 2000}, \quad t = 0{,}15 \text{ с}.$$

Пример 5. Свариваются детали также из стали 1Х18Н10Т толщиной 2 + 2 мм; $d_т = 8$ мм; $P = 8$ кН;

$$I = \frac{140 \cdot 10^3 \cdot 0{,}8}{\sqrt{130}} = 9824 \text{ А}.$$

При $h/\delta = 1{,}2$ К = 36. Время сварки $t = 0{,}34$ с.

Пример 6. Свариваются детали из Ст3 толщиной 20 + + 20 мм. Диаметр ядра для таких толщин не регламентирован. Примем $d_т = 40$ мм; $h/\delta = 1{,}2$.

Используя те же пропорциональности, находим:

$$\frac{I}{4} = \frac{12}{1{,}05}, \quad I = 45{,}7 \text{ кА};$$

$$\frac{P}{(4)^2} = \frac{7{,}5}{(1{,}05)^2}, \quad P = 109 \text{ кН};$$

$$36 = \frac{2089 \cdot 10^6 \cdot 140 \cdot 10^{-6} \sqrt{t} \cdot 1{,}2 \cdot 25\,000}{4 \cdot 2140 \cdot 109 \cdot 10^3}, \quad t = 14{,}6 \text{ с}.$$

Если силу сжатия увеличить до 125 кН, а силу сварочного тока до 50 кА, то при том же значении критерия К = 36 время сварки придется увеличить до 19,4 с.

Для сварки листов бо́льших толщин необходимо сделать некоторые дополнительные замечания. Дело в том, что современные точечные машины бо́льших мощностей работают по сложным циклам подогрев + сварка и сварочное давление + проковка. Необходимо выяснить, как скажутся на критериальных числах эти усложненные режимы нагрева металла. Для этой цели обратимся к опытным данным, но одновременно вспомним физический смысл критерия К. Как было показано ранее, критерий К — это отношение количества теплоты, необходимой для создания расплавленного ядра, к тепловым потерям в массу металла, окружающую ядро, в момент выключения тока, т. е. в момент сформирования расплавленного ядра.

Исходя из этого положения следует задуматься: значительно ли изменяется это отношение от того, что мы будем «вкладывать» теплоту в ядро с помощью разных по величине токов при разных давлениях, но за какой-то суммарный промежуток времени, равный и времени подогрева, и времени собственно сварки?

Если учесть, что и при непрерывном нагреве критерий К колеблется в заметных пределах от минимума до максимума, то есть основания полагать, что эти пределы вряд ли сильно изменятся и при цикле с подогревом. Рассмотрим в связи с этим конкретные опытные данные.

Для стали Ст3 толщиной 5 + 5 мм ($\sigma_т$ = 250 МПа) получены опытные данные: $I_{пд}$ = 10 кА; $t_{пд}$ = 1,2 с; $t_{ох}$ = 0,25 с; $I_{св}$ = = 14,5 кА; $t_{св}$ = 1,25 с; $d_т$ = 1,6 см; P = 10 кН.

Рассчитываем критерий К так, как будто существовал процесс непрерывного включения длительностью t = 1,2 + 0,25 + 1,25 = = 2,7 с при $I_{св}$ = 14,5 кА. Тогда при h/δ = 1

$$К = \frac{210 \cdot 10^6 \cdot 140 \cdot 10^{-6} \sqrt{2,7} \cdot 25000 \cdot 1}{1,6 \cdot 2140 \cdot 10000} = 35,2.$$

Имеются данные по сварке листов стали SAE 4340 (близкая по свойствам к стали 40 или 45) толщиной 9,5 + 9,5 мм. При $\sigma_т$ = 430 МПа; $t_{пд}$ = 3,9 с; $I_{пд}$ = 14 кА; $t_{св}$ = 3,8 с; $I_{св}$ = = 22,3 кА; $d_т$ = 2,5 см; $P_{пд}$ = 82,2 кН; $P_{св}$ = 49,3 кН критерий К = 32.

Еще одно измерение для образцов стали Ст3 толщиной 16 + + 16 мм: $I_{пд}$ = 25 кА; $t_{пд}$ = 6 с; $I_{св}$ = 41,5 кА; $t_{св}$ = 6 с; $d_т$ = 4,7 см; $P_{св}$ = 49,5 кН, в этом случае К = 42.

Во всех этих примерах высота ядра принята (измерений нет) h/δ = 1.

Как видно, практические расчеты сложных циклов с подогревом и проковкой можно действительно рассчитать так, как будто дело идет о цикле непрерывного нагрева. При этом вычислении критерия учитывают сваривающий ток, давление, действующее

во время протекания тока, а время следует считать равным сумме времени подогрева и сварки.

В современной практике сварочного производства уже встречаются примеры применения точечной сварки для тройных толщин. Например, существуют следующие опытные данные ВНИИЭСО для листов из стали Ст3 толщиной 20 + 20 мм. При сварке по циклу без подогрева использовались режимы: $I = 52 \div 71$ кА; $P = 100 \div 125$ кН; $d_т = 33 \div 50$ мм; $t = 20 \div 15$ с.

Прежде чем рассчитать значения критерия К, обратим внимание на то, что при сварке тройной толщины по физическому смыслу этого критерия он должен получаться бо́льшим приблизительно в 1,33 раза, чем для двух листов тех же толщин. Действительно, для сварки двух листов

$$К_{2б} = Q/(2q_м).$$

При сварке трех листов получаются два расплавленных ядра. Следовательно, при том же токе необходимо выделить теплоты уже $2Q$, а потери теплоты вместо $2q_м$ станут равными $3q_м$. Отсюда и К для трех листов

$$К_{3б} = \frac{2Q}{3q_м} = \frac{2}{1{,}5}\left(\frac{Q}{2q_м}\right) = 1{,}33\,\frac{Q}{2q_м} = 1{,}33\ К_{2б}.$$

Проверяя это по опытным данным, получаем

$$К_{3б} = \frac{(52)^2 \cdot 10^6 \cdot 140 \cdot 10^{-6}\sqrt{20} \cdot 2400 \cdot 1}{3{,}3 \cdot 2140 \cdot 10\,000} = 58.$$

Для нормальной сварки двух листов при том же режиме $К_{2б} = 43$.

Для максимального предела тока

$$К_{3б} = 47; \qquad К_{2б} = 35.$$

Все рассмотренные здесь примеры показывают, что колебания числа К для современных режимов точечной сварки действительно могут приниматься в пределах 25—50 или в среднем около 36. Все это относится не только к большим, но и к малым толщинам.

Приведенные расчетные примеры относились к условиям хорошо зачищенных листов вообще, без учета способа зачистки. Для того чтобы выяснить, в какой мере различными будут условия тепловыделения, например, для холодного́ проката и горячекатаного с зачисткой наждачным кругом, рассмотрим следующий пример.

Горячекатаная пластина из Ст3 толщиной 3 мм после зачистки наждачным кругом до блеска имеет размер 2,5 мм. Диаметр точки $d_т = 9$ мм, $A_a = \pi d_т^2/4 = 0{,}636$ см^2, $P = 6$ кН. Предел текучести $\sigma_т = 250$ МПа; $\Delta = 80$ мкм; $a = 800$ мкм; $a/\Delta = 10$; $b = 2$ (см. табл. 5 приложения). Критерий для холодного контакта [см. формулу (1.10)]

$$Z = \frac{4 \cdot 6000 \cdot 1}{3A_с 2500} = \frac{0{,}32}{A_с}.$$

По формуле (1.8) для $A_a = 0{,}636$ см^2 находим: $A_c = 0{,}375$ см^2, $d_0 = 0{,}69$ см.

Давление в холодном контакте

$$p = P/A_c = 160 \text{ МПа}.$$

Отношение $p/\sigma_т = 160/250 = 0{,}64$, и, соответственно $e^{0{,}64} = 1{,}9$.

Для грубой обработки

$$X = \frac{p}{\sigma_т 2b} = \frac{0{,}64}{2 \cdot 2} = 0{,}16.$$

По формулам (1.77), (1.80) находим:

$$e^{-X} = 0{,}85; \qquad \sqrt{1 - e^{-X}} = 0{,}39;$$

$$f = \frac{80}{2 - 0{,}85 + 0{,}39} = 52 \text{ мкм}.$$

Удельное сопротивление шероховатости по формуле (1.78) $\rho_\Delta = 20\ (1 + 10 \cdot 1{,}9) = 400$ мкОм·см;

$$r_{мг\,0} = \frac{2 \cdot 400 \cdot 52}{0{,}375 \cdot 0{,}39 \cdot 10^4} = 28 \text{ мкОм}.$$

Это составляющая полного сопротивления холодного контакта, определяемая шероховатостью двух поверхностей, обработанных наждачным кругом.

Найдем ту же составляющую для холоднокатаных листов. Для них примем: толщина 2,5 + 2,5 мм; $\Delta = 3$ мм; $a = 900$ мкм; $a/\Delta = 300$; $b = 6$;

$$\rho_\Delta = 20\ (1 + 300 \cdot 1{,}9) = 11\,420 \text{ мкОм·см};$$

$$X_{чист} = \frac{\sigma}{\sigma_т b} = \frac{0{,}64}{6} = 0{,}106;$$

$$e^{-X} = 0{,}89; \qquad \sqrt{1 - e^{-X}} = 0{,}33;$$

$$f = \frac{3}{2 - 0{,}89 + 0{,}33} = 2{,}08 \text{ мкм};$$

$$r_{мг\,0} = \frac{2 \cdot 11\,420 \cdot 2{,}08}{0{,}33 \cdot 0{,}375 \cdot 10^4} = 38 \text{ мкОм}.$$

Как видно, начальное сопротивление холодного контакта для холодного проката, т. е. гладких поверхностей, больше, чем для грубообработанных.

Определим полное сопротивление холодного контакта. Примем силу сварочного тока $I = 12{,}5$ кА для обоих случаев.

Среднее значение напряженности магнитного поля в металле вокруг свариваемой точки (см. рис. 2.4)

$$H_{ср} = \frac{I \ln (D/d_0)}{\pi (D - d_0)} = \frac{12\,500 \ln (10/0{,}69)}{\pi (10 - 0{,}69)} = 11\,300 \text{ Тл}.$$

По кривой намагничивания среднее значение магнитной проницаемости $\mu = 4$. Эквивалентная глубина проникания тока [см. формулу (2.16)]

$$\delta_{экв} = 5000 \sqrt{\frac{20}{10^6 \cdot 4 \cdot 50}} = 1{,}6 \text{ см}.$$

Поперечный размер зоны растекания тока по середине листа в начальный момент включения тока по формуле (2.25)

$$b_0 = 1{,}6/(2{,}64 + 0{,}5) = 0{,}51 \text{ см}.$$

Составляющая полного сопротивления контакта, определяемая объемным сопротивлением металла по формуле (2.23)

$$r_{гт\,0} = \frac{2 \cdot 4\rho_0\delta}{\pi d_0 b_0} = \frac{2 \cdot 4 \cdot 20 \cdot 0{,}25}{3{,}14 \cdot 0{,}69 \cdot 0{,}51} = 36 \text{ мкОм}.$$

Полное сопротивление холодного контакта для грубой зачистки 36 + 28 = 64 мкОм, для холоднокатаных листов 74 мкОм. Эта разница в сопротивлениях холодных контактов на конечном размере диаметра ядра скажется только в долях миллиметра, т. е. несущественно. И если будет задано такое время включения тока и сжатия, что диаметр ядра будет действительно получаться равным 9 мм, то сопротивление сваренной точки в момент выключения тока окажется близким к значению

$$r_т = \rho_т h/A_a = 140 \cdot 0{,}25/0{,}636 = 55 \text{ мкОм}.$$

Как видно, расчет согласуется с опытными данными (рис. 1.27), которые говорят о близких друг другу сопротивлениях: $R_{кт0} \approx \approx r_т$.

После того как определены из таблиц или критериально рассчитаны сварочные токи и давления, определяются токи шунтирования и вторичное напряжение холостого хода машины. Для того чтобы иметь случай убедиться в реальности токов шунтирования и достоверности метода расчета, рассмотрим следующий конкретный пример: из Ст3 свариваются две пластины толщиной 4 + 4 мм, шириной 100 мм. Сварочный ток для единичной точки 14 кА. Диаметр точки $d_т = 14$ мм. Первый случай — расстояние между центрами точек $l = 6$ см. Тогда

$$l/d_т = 6/1{,}4 = 4{,}3.$$

Для этого отношения по кривой рис. 2.9 находим $h_э/l = 1{,}45$. Следовательно, ширина эквивалентной полосы $h_э = 8{,}7$ см. В данном случае ток распространяется на ширину $h_э$, меньшую, чем реальная ширина пластины, что объясняется, как видно, близким расположением точек. Сопротивление горячей точки

$$r_т = \frac{4\rho_т\delta}{\pi d_w^2} = \frac{4 \cdot 140 \cdot 0{,}4 \cdot 10^{-6}}{3{,}14 \cdot 1{,}96} \approx 36 \text{ мкОм}.$$

Падение напряжения на этом сопротивлении

$$U_ш = r_т I 10^{-6} = 14\,000 \cdot 36 \cdot 10^{-6} = 0{,}5 \text{ В}.$$

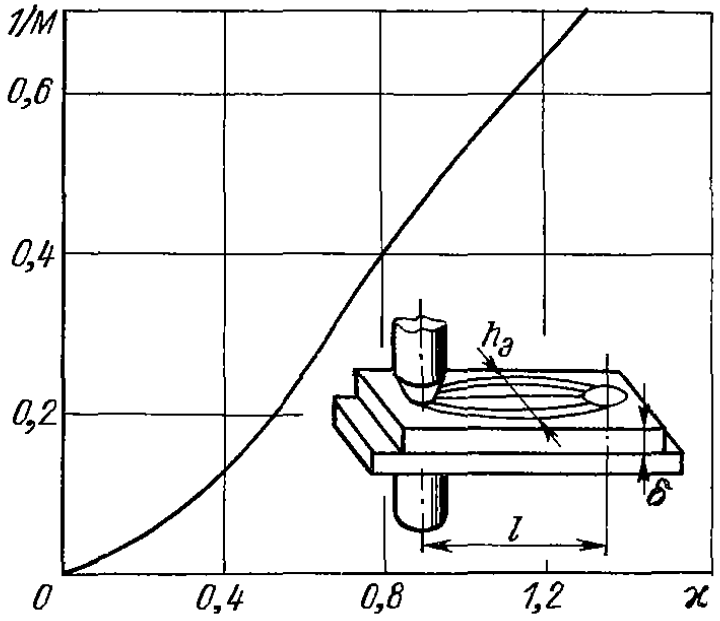


Рис. 4.10. Расчетная кривая функции $1/M = f(\varkappa)$

Обращаемся к равенству (2.37):

$$\frac{2l\,\delta h_э}{25U_ш u} = \frac{\varkappa^2}{\sqrt{a^2+b^2}}.$$

В нем согласно выражениям (2.29) и (2.30)

$$a = 1 + 0{,}6\varkappa\sqrt{\varkappa};\quad b = 0{,}84\varkappa.$$

Функция $\varkappa^2/\sqrt{a^2+b^2} = 1/M$ в равенстве (2.37) показана приближенной, равной $0{,}55\varkappa$. В действительности это справедливо только для значений $\varkappa \geqslant 0{,}8$. Полностью, в том числе для малых значений $\varkappa$, кривая показана на рис. 4.10. Используем эту кривую для расчета. В данном случае

$$\frac{2l\,\delta h_э}{25U_ш u} = \frac{2\cdot 6\cdot 0{,}4\cdot 8{,}7}{25\cdot 0{,}5\cdot 2\,(0{,}4+8{,}7)} = 0{,}183,$$

где $U_ш = Ir_т$; $u = 2(\delta + h_э)$.

По этому значению $1/M = 0{,}183$ находим $\varkappa = 0{,}5$.

Электрическое сопротивление постоянному току обеих пластин

$$R_{ош} = 2\cdot 20\cdot 6/(0{,}4\cdot 8{,}7) = 69 \text{ мкОм}.$$

Активное и индуктивное сопротивления ветви шунтирования таковы:

$$R_ш = R_{ош}\left(1 + 0{,}6\varkappa\sqrt{\varkappa}\right) = 69\left(1 + 0{,}6\cdot 0{,}5\sqrt{0{,}5}\right) = 83 \text{ мкОм};$$

$$X_ш = R_{ош}0{,}84\varkappa = 69\cdot 0{,}84\cdot 0{,}5 = 30 \text{ мкОм};$$

$$Z_ш = \sqrt{83^2 + 30^2} = 88 \text{ мкОм}.$$

Следует посмотреть, составит ли в ветви шунтирования существенную добавку сопротивление ранее сваренной, теперь уже холодной точки, через которую проходит шунтирующий ток

$$r_{т\,(хол)} = 20\cdot 0{,}4\cdot 4/(3{,}14\cdot 1{,}96) = 5 \text{ мкОм}.$$

Общее сопротивление ветви шунтирования

$$Z_{ш\,(общ)} = 88 + 5 = 93 \text{ мкОм}.$$

Ток шунтирования

$$I_ш = U_ш/Z_{ш\,(общ)} = 0{,}5/(93\cdot 10^{6}) = 5150 \text{ А}.$$

Расчет полностью соответствует опыту (см. рис. 2.10). Как видно, при столь близком расстоянии между центрами точек при

толщине 4 + 4 мм шунтирование очень сильное. Для того чтобы в таких условиях обеспечивать диаметр точки тем же размером 14 мм, для второй точки надо поднимать вторичное напряжение более чем в 1,5 раза или увеличивать время включения тока или же регулировать оба эти параметра согласно показаниям критерия К.

Рассмотрим второй случай для тех же деталей относительно малого шунтирования, когда расстояние между центрами точек составит, например, 200 мм. Тогда:

$$l/d = 20/1{,}4 = 14{,}2;\ h_э/l = 1,$$

т. е. если бы сваривались бесконечно протяженные листы, то ток растекался бы на 200 мм. Однако в данном случае ширина пластин только 100 мм. Следовательно, эту реальную ширину и считаем как $h_э$. Тогда

$$\frac{2l\,\delta h_э}{25U_ш u} = \frac{2\cdot 20\cdot 0{,}4\cdot 10}{25\cdot 0{,}5\cdot 2\,(10+0{,}4)} = 0{,}61.$$

По кривой, приведенной на рис. 4.10,

$$\varkappa = 1{,}1; \qquad 2R_{ош} = 2\cdot 20\cdot 20/(0{,}4\cdot 10) = 200 \text{ мкОм};$$

$$R_ш = 200\left(1+0{,}6\cdot 1{,}1\sqrt{1{,}1}\right) = 370 \text{ мкОм};$$

$$X_ш = 200\cdot 0{,}84\cdot 1{,}1 = 185 \text{ мкОм};$$

$$Z_ш = 413 \text{ мкОм};$$

$$I_ш = 0{,}5\cdot 10^6/413 = 1210 \text{ А}.$$

Совпадение расчетных данных с опытной кривой (см. рис. 2.10) хорошее. Таким образом, при сварке стальных деталей даже средних толщин пренебрегать токами шунтирования нельзя. Расчеты показали также, что при сварке магнитного металла величина $Z_ш$ заметно превышает величину сопротивления постоянному току $R_{ош}$. Если же дело идет о сварке немагнитного металла (коррозионно-стойкой стали, сплавах титана), то активное сопротивление $R_{ош}$ получается немалое, а токи шунтирования не столь значительны в отличие от токов при сварке таких металлов, как алюминиевые и магниевые сплавы и латуни. Удельное сопротивление мало и сравнительно слабо выражен поверхностный эффект, благодаря которому приходится рассчитывать не $Z_ш$, а только активное сопротивление по формуле (2.29), которое мало отличается от того, что определяется по формуле (2.32) или (2.33).

Если сварка идет на постоянном токе, то в цепи шунтирования действует чисто активное сопротивление. Явление шунтирования обязывает технологов ставить точки обязательно одну за другой (*1—2—3*, рис. 4.11) последовательно. Сваривая точку *2* между созданными ранее *1* и *3*, получаем двойное шунтирование. Если же точки ставятся в линию, последовательно одна за другой, то шунтирование надо учитывать только из свариваемой третьей в сваренную вторую. Можно убедиться, то в первую точку ток

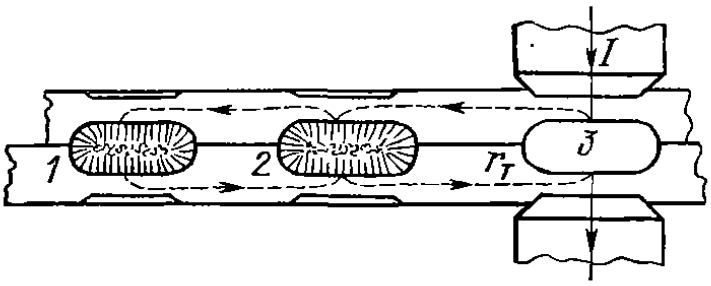


Рис. 4.11. Схема шунтирования тока при свариванин продольного ряда точек

шунтирования пренебрежимо мал. Для рассмотренного примера даже сильного шунтирования, когда $l = 60$ мм, в третью точку будет проходить шунтирующий ток, создаваемый падением напряжения,

$$I_{ш} r_{т\ (хол)} = 5150 \cdot 5 \cdot 10^{-6} = 0{,}025 \text{ В}.$$

Это в 20 раз меньше того падения напряжения 0,5 В, которое и создавало ток шунтирования. Следовательно, ток шунтирования в первую точку от свариваемой третьей будет только 257 А. А это уже несущественная величина.

Токами шунтирования пренебрегать нельзя. О них надо помнить и их учитывать. Для многоточечных соединений первую точку сваривают или на пониженном вторичном напряжении, или меняют время включения. Самым, однако, универсальным средством борьбы с шунтированием считается переход с точечной сварки на рельефную, если это оказывается рациональным по всем конструктивным и технико-экономическим показателям.

Расчет режима единичной точки дополняется расчетами шунтирования, поскольку в сварных конструкциях единичные точки бывают довольно редко. И все-таки эти расчеты оказываются недостаточными, если сваривается какая-либо крупногабаритная конструкция из магнитного металла. Нельзя забывать о том, что массивные свариваемые изделия, включаемые в контур машины, могут в целом весьма заметно изменить внешнюю характеристику вторичного контура за счет собственной индуктивности свариваемых деталей из магнитных металлов. Этот факт довольно часто приводил к экспериментальным ошибкам. Так, в частности, при окончательном корректировании сварочного тока обычно сваривают серию образцов для разрывных испытаний. Образцы используют в виде малогабаритных пластин, в этом случае вносимая индуктивность даже металлов с высокой магнитной проницаемостью несущественна из-за их малых габаритных размеров. Перенося отработанные на образцах режимы на натурные крупногабаритные конструкции, не учитывают факта изменения внешней характеристики машины при введении в сварочный контур натурных изделий. Отсюда следует вывод для технологов: подбирая режим сварки на пластинах, в контуре машины следует держать ту самую натурную модель, которую придется сваривать в реальной практике. Если же подбор режима идет задолго до создания реальной свариваемой конструкции, то корректирование будущего сварочного тока надо обеспечивать расчетным путем.

Приведем численный пример. Допустим, для рассчитанного ранее случая сварки стальных листов толщиной 2,5 + 2,5 мм при-

нимается плоская деталь с габаритными размерами 1000×1000 мм. Положим, что вторичный контур машины позволяет вдвинуть в него деталь только на 500 мм. Используем формулу (2.41)

$$X_{\text{мп}} = 36\,000\,\delta A \ln (2A/d_{\text{т}})\, 10^{-6}/I.$$

Для нашего случая: $\delta = 0{,}25$ см; $A = 50$ см; $d_{\text{т}} = 0{,}9$ см; $I = 12{,}5$ кА. Соответственно этим значениям получаем, что плоская конструкция, полностью вдвинутая в сварочный контур, создает в нем дополнительное индуктивное сопротивление порядка $X_{\text{мп}} = 170$ мкОм. Если же из этого металла будет свариваться какая-нибудь обечайка цилиндрической формы диаметром несравнимо большим, чем толщина листов, то по формуле (2.43) дополнительно получаем

$$X_{\text{мк}} = 72\,000 l \delta 10^{-6}/I,$$

при $l = 50$ см получим $X_{\text{мк}} = 72$ мкОм.

Поскольку для обечайки индуктивности за счет плоского поля и кольцевого суммируются, то общая индуктивность

$$X_{\text{мп}} + X_{\text{мк}} = 220 \text{ мкОм}.$$

Как известно, собственная индуктивность точечных машин средней мощности только примерно в два раза превышает индуктивность таких свариваемых деталей. Это значит, что в процессе сварки крупногабаритных стальных магнитных деталей, когда точки ставятся то на крае конструкции, когда $X_{\text{мп}} + X_{\text{мк}} = 0$, то на середине, когда эта сумма велика, сварочные токи от точки к точке заметно меняются, следовательно, меняются и диаметры точек.

Разумеется, детали из немагнитных металлов, для которых абсолютная магнитная проницаемость, как и для воздуха, равна единице, своей массой дополнительной индуктивности не создают. Не создают такой индуктивности и стальные магнитные детали, если сварка идет на выпрямленном (постоянном) токе. Следует обратить внимание на то, что формулы (2.41), (2.43), так же как и формулы (2.36) и (2.38), относящиеся к шунтированию, создавались для переменного тока нормальной частоты. При сварке униполярным током на конденсаторных машинах длительность импульса может быть такой же, как волна переменного тока, т. е. 0,02 с. Это значит, что для дюралюминия эквивалентная глубина проникания, согласно формуле (2.18),

$$\delta_{\text{экв}} = \frac{5000}{10^3} \sqrt{\frac{3{,}5 \cdot 0{,}02}{1}} \approx 1{,}32 \text{ см}.$$

Следовательно, толщина листов до $\delta = 2{,}64$ см будет пронизываться током шунтирования полностью так же, как это имеет место при частоте переменного тока 50 Гц. Расчетная формула шунтирования (2.32) или (2.33) должна использоваться с учетом реальной толщины металла (до 2,64 см) и с учетом $\delta = 2\delta_{\text{экв}}$ при большой реально свариваемой толщине.

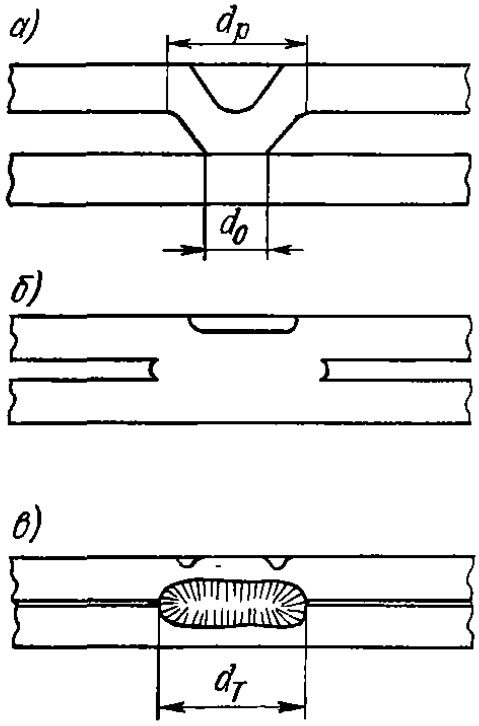


Рис. 4.12. Схема формирования рельефно-сварного соединения

Рельефная сварка при простейших конструкциях рельефа почти ничем не отличается от сварки точечной. Схема формирования единичного рельефно-сварного соединения в последовательных стадиях нагрева рельефа и его деформации показана на рис. 4.12. Рельеф является идеальным концентратором электротепловыделения, поскольку это резковыделяющийся выступ, и притом выступ, обычно свободный от окалины и ржавчины. Время включения сварочного тока принимают поэтому обычно на 30—40 % меньше, чем при точечной сварке ядра таким же диаметром, как диаметр рельефа $d_р$ (рис. 4.12).

Относительная кратковременность действия сварочного тока при рельефной сварке определяется более высокой концентрацией плотности тока в контакте, особенно в начальный период нагрева (см. рис. 4.12, *а*). В последующем (рис. 4.12, *б*) рельеф сминается и нагрев идет примерно с такими же скоростями, как и в аналогичных условиях точечной сварки. Завершается процесс (рис. 4.12, *в*) формированием расплавленного ядра. В современной практике используют самые разнообразные формы рельефов, о них будет речь далее. Наиболее распространенной формой рельефа принят выступ, близкий к шаровому сегменту с размерами, показанными на рис. 4.13. Полное сопротивление рельефа в процессе его сваривания меняется своеобразно, как это показано на рис. 4.14 кривой *1—1*. В начальный период нагрев идет, как для стыкового контакта (кривая *1—2*), но как

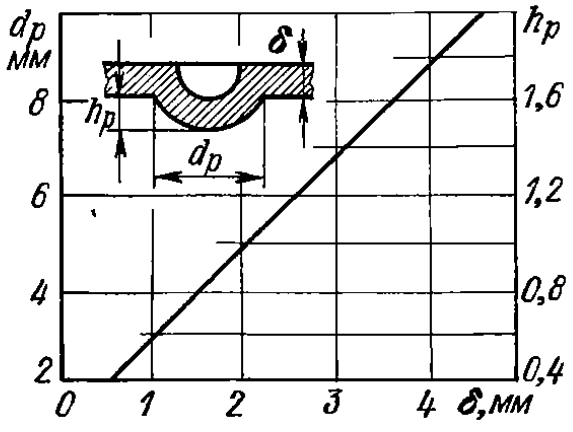


Рис. 4.13. Размеры рельефа в зависимости от толщины металла

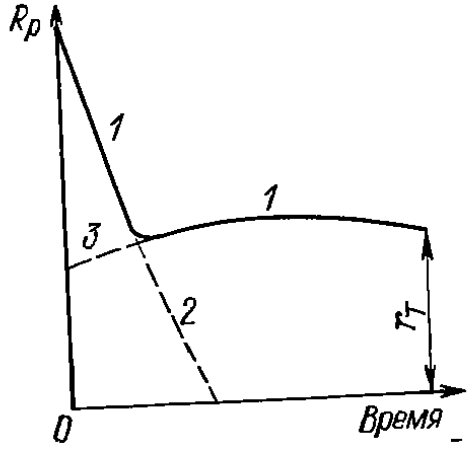


Рис. 4.14. Осциллограммы изменения в процессе сварки полного сопротивления контакта: рельефа *1—1*; стыкового соединения *1—2*; точечного соединения *3—1*

только рельеф смят, сопротивление меняется по закону *3—1*, характерному для точечной сварки. Если речь идет с сегментно-шаровой форме рельефа, то процесс его деформации описывается согласно формуле (1.70), по такой закономерности (см. рис. 4.12, *а* и *в*):

$$d_0 = d_т \sqrt{1 - e^{-Z}}.$$

Для холодного рельефного контакта, когда его сопротивление подобно стыковому, это сопротивление можно учитывать по формуле (3.12):

$$R_{кр\,0} = \frac{\rho_0}{d_0}\left(\sqrt{\frac{\sigma_т}{p}} - 1\right).$$

Изменение сопротивления контакта от температуры следует считать с учетом изменения удельного сопротивления металла. В практической электротехнике для небольших температур нагрева рекомендуется общеизвестное соотношение

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha T),$$

где температура T — в °С. Для высоких температур больше подходит соотношение

$$\rho = \rho_т \theta / \theta_{пл}, \qquad (4.16)$$

где $\rho_т$ — удельное сопротивление металла в момент начала его плавления; θ и $\theta_{пл}$ — абсолютные температуры.

Полное сопротивление сваренного рельефа получается так:

$$R_{кр} = \frac{\rho_т \theta / \theta_{пл}}{d_т \sqrt{1 - e^{-Z}}}. \qquad (4.17)$$

При $Z \approx 4$, т. е. при полном смятии рельефа и начале формирования ядра, формула (4.17) превращается в следующую:

$$R_{кр} = \frac{\rho_т \theta / \theta_{пл}}{d_т}. \qquad (4.18)$$

Это теоретическое соотношение настолько любопытно, что дает основание еще раз вернуться к понятиям электрических сопротивлений свариваемых деталей. Дело здесь не в точности расчетов, а в точности электрофизических представлений. В теоретической электротехнике при исследовании электростатических полей на основе решений уравнения Лапласа

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = 0$$

для многих геометрических фигур определены картины силовых линий взаимодействия электрических зарядов и электрических потенциалов. Задачи такого рода понадобились для исследования электрических емкостей разного рода фигур, различной геометрической формы. Наиболее полно электрические емкости исследованы

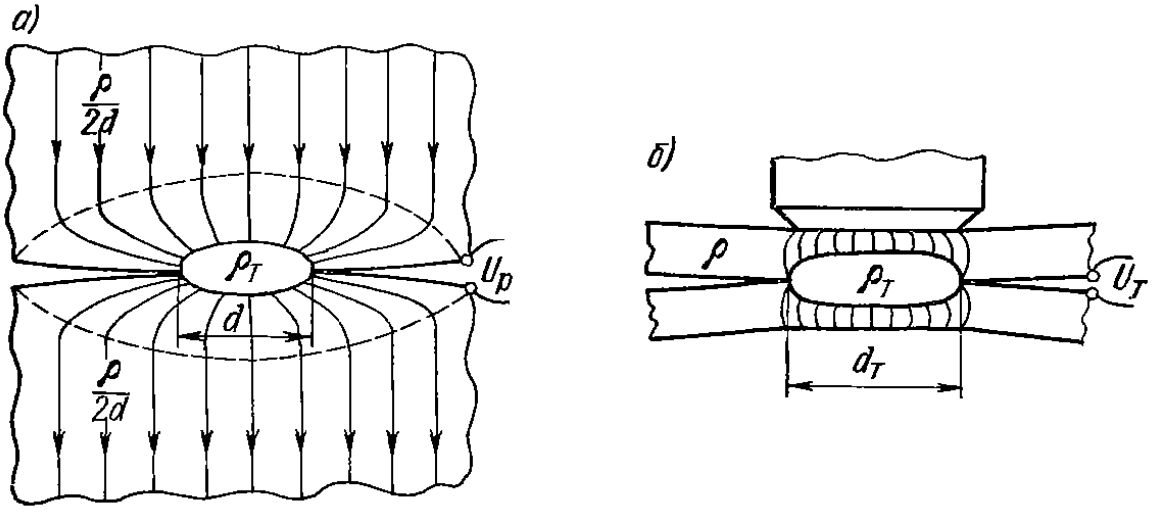


Рис. 4.15. Сравнительная картина силовых линий тока вокруг контакта: *а* — бесконечно протяженных деталей; *б* — двух листов обыкновенной толщины

в книге [13]. Уравнение Лапласа описывает распределение электрического заряда или электрического потенциала в пространстве по координатам x. Картины эти статические, они не зависят ни от каких магнитных полей. Таким образом, статические лапласовские распределения силовых взаимодействий для движения и действия электрических токов принципиально не отвечают реальной действительности. Для электромагнитных полей действительны уравнения (2.3) и (2.4). Тем не менее решения уравнений Лапласа, если не учитывать для каких-то отдельных областей действие магнитных сил, позволяют отождествлять статические эквипотенциальные линии взаимодействия зарядов с силовыми линиями электрического тока, когда в исследуемых моделях действует электродвижущая сила, равная электрическому потенциалу зарядов. На основании такого допущения в теоретической электротехнике установлена такая взаимосвязь между электрической емкостью промежутка C и его электрическим сопротивлением R:

$$RC = \varepsilon\rho, \tag{4.19}$$

где ε — диэлектрическая постоянная среды; ρ — ее удельное сопротивление. Если, например, бесконечно тонкий диск диметром d расположен в пространстве и заряжен потенциалом E (от него, таким образом, силовые линии направлены в обе стороны пространства), то электрическая емкость такого диска равна

$$C = 2\varepsilon d.$$

Следовательно, электрическое сопротивление, которое будет определяться пространством, охваченным линиями тока, в металле также направленными в обе стороны пространства от диска диаметром d, согласно формуле (4.19), таково:

$$R = \frac{\varepsilon\rho}{c} = \frac{\varepsilon\rho}{2\varepsilon d} = \frac{\rho}{2d}.$$

Но если, как это имеет место в модели на рис. 4.15, *а*, линии тока пронизывают диск с одной его стороны в другую, то электрическое сопротивление диска, а в данном случае плоскости рельефного контакта, окажется таким:

$$R_{кр} = \frac{\Delta U_р}{I} = 2R = \frac{\rho_р}{d}. \qquad (4.20)$$

В то же время, как было ранее установлено (рис. 4.15, а также рис. 1.25), горячий точечный контакт листов ограниченной толщины более точно отвечает равенству

$$R_{кт} = \Delta U_т / I = 4\rho_т h/(\pi d_т^2). \qquad (4.21)$$

Вполне естественно, что при одинаковых d и $\rho_р = \rho_т$ равенство (4.20) дает численно бо́льшую величину при всех практически реальных отношениях h/d. Это видно даже из схемы распределения линий тока на рис. 4.15. На верхней из них при бесконечно протяженных деталях между измеряющими точками падение напряжения

$$\Delta U_р > \Delta U_т,$$

поскольку на левой схеме охватывается значительно большее число силовых линий, чем на правой, да еще и с большей их кривизной.

Изложенные соображения об электрических контактных сопротивлениях нужны не только для понимания, но и для расчета режимов нагрева различных по форме рельефных контактов. Рассмотрим некоторые из них, наиболее распространенные. Рельефные конструкции весьма разнообразны. Некоторые из них показаны на рис. 2.27. Для расчета электрических сопротивлений теоретическая электротехника дает следующие формулы:

$$R_{кр} = \frac{\rho_т \theta/\theta_{пл}}{2d}\left(1 + \frac{8l}{\pi d}\right). \qquad (4.22)$$

Для конструкции рельефа с вставной расплавляемой шайбой, которая создает цилиндрическую точку

$$R_{кр} = \frac{\rho_т \theta/\theta_{пл}}{d}\left(1 + \frac{4l}{\pi d}\right). \qquad (4.23)$$

Для кольцевого рельефа

$$R_{кр} = \frac{\rho_т \theta/\theta_{пл}}{2(D-d)}\left[1 + \frac{8l}{\pi(D-d)}\right]. \qquad (4.24)$$

В формулах (4.22)—(4.24) значение $\theta/\theta_{пл}$ все же не следует принимать равным единице, поскольку в этих формулах учитывается не только плоскость контакта, но и пространство вокруг него с температурой заметно ниже точки плавления. На практике имеют распространение два характерных рельефно-сварных соединения, показанных на рис. 4.16. Первое из них — это приварка круглых стержней или проволок к плоскости, второе — кресто-

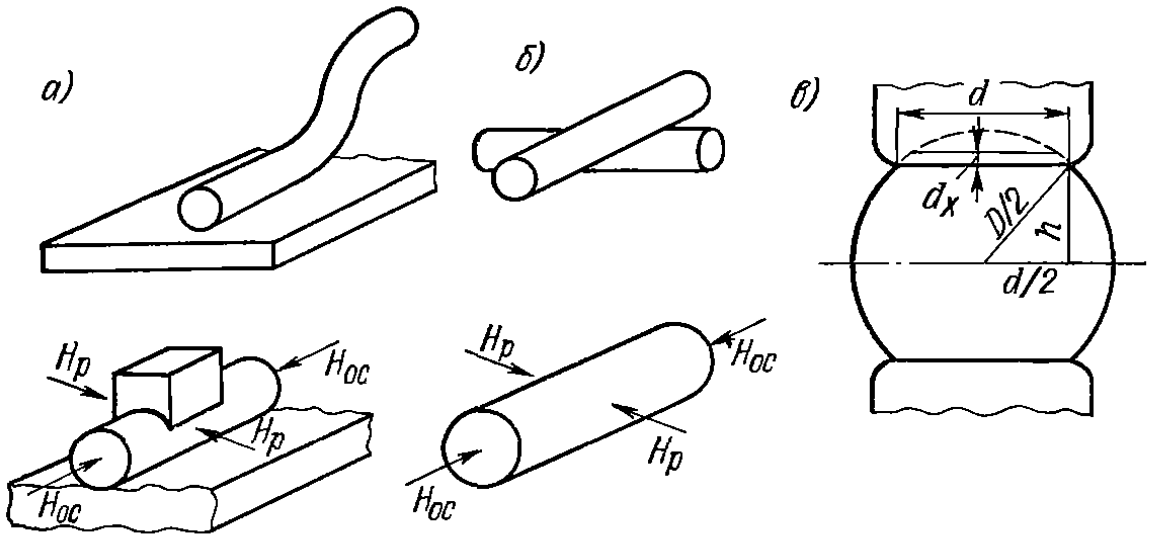


Рис. 4.16. Крестообразные рельефные соединения: *а* — стержень с плоскостью; *б* — стержень со стержнем; *в* — расчетная схема проводимости деталей

образные проволочно-стержневые соединения. В подавляющем большинстве соединения такого рода изготавливают из конструкционных магнитных сталей. Этот факт обеспечивает настолько большое сжатие силовых линий тока от поля $H_{ос}$ по сравнению с $H_р$, что форму распределения тока по стержню (рис. 4.16, *в*) можно считать в виде шара диаметром D. Тогда, соответственно, при обозначениях, приведенных на рис. 4.16, *в*,

$$d^2 = D^2 - 4h^2.$$

Электрическое сопротивление полушария

$$\frac{R}{2} = \int_0^h \frac{4\rho\, dh}{\pi d^2} = \frac{4\rho}{\pi} \int_0^h \frac{dh}{D^2 - 4h^2} = \frac{4\rho}{\pi D^2} \int_0^h \frac{dh}{1 - 4h^2/D^2}.$$

При $h = \delta/2$

$$\frac{R}{2} = \frac{\rho}{\pi D} \ln \frac{1 + \delta/D}{1 - \delta/D}. \qquad (4.25)$$

Режим сварки следует обеспечивать таким, чтобы стержень не был смят более чем на $\delta \ll 0{,}8D$. Тогда сопротивление половины стержня при $\ln [(1 + 0{,}8)/1 - 0{,}8)] \approx 2$

$$R/2 = 2\rho/(\pi D),$$

а целого стержня

$$R = 4\rho/(\pi D). \qquad (4.26)$$

Следует обратить внимание на то, что крестообразные соединения характеризуются сравнительно высоким сопротивлением. Например, сопротивление сеточных конструкций из проволок диаметром 4 мм при среднем значении удельного сопротивления

в момент свариваемости $\rho = 80$ мкОм·см для двух стержней составляет 530 мкОм. Этот факт необходимо учитывать при выборе сварочного оборудования.

4.4. Типовые конструкции для применения точечной и рельефной сварки

Если содержание этого параграфа подчинить буквальному смыслу его названия, то вместо него следовало бы создать очень большой атлас современных точечно и рельефно-сварных соединений и конструкций. Какова же амплитуда свариваемых толщин? В области электроники — это микросварка с толщиной детали от 4 мкм, до десятых долей миллиметра; в области автомобиле-, вагоно-, самолето- и ракетостроения — от долей миллиметра до 2—6 мм, реже 8 мм; в строительных конструкциях — свыше 8 мм и до 30 мм. Что касается свариваемых металлов, то для точечной сварки понятие свариваемости значительно более широкое, чем для процессов сварки дуговой и плазменной. Вряд ли вообще можно говорить о неприменимости точечной сварки даже для самых сложных современных сталей и сплавов.

Здесь рассмотрены только некоторые точечно-сварные соединения и конструкции: не просто конструктивные формы (их может быть бесчисленное множество [10, 14]), а изделия, на примере которых технолог может создавать наиболее рациональную и производственно доступную технологическую оснастку или даже решать задачу о специализации оборудования.

Единичные точечно-сварные соединения характерны, главным образом, для мелких изделий приборо- и машиностроения. Для крупных деталей единичные точки, как редкость, встречаются в конструкции типа ферм из прокатного или штампованного сортамента. Для листовых конструкций характерны многоточечные сварные элементы, показанные на рис. 4.17. Характерно, что при растяжении соединения с силой P максимальные нагрузки испытывают крайние точки.

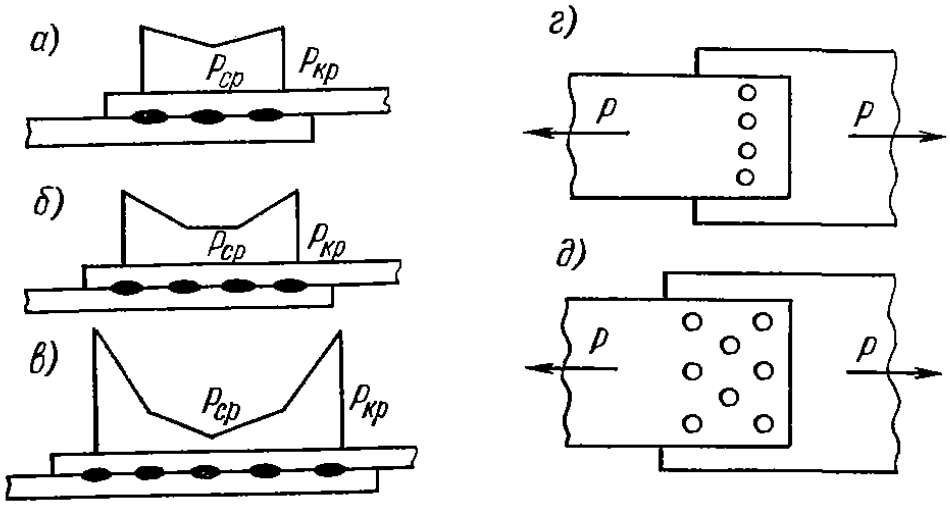


Рис. 4.17. Типы многоточечных соединений ($P_{ср}$ и $P_{кр}$ — средняя и критическая нагрузки в соединении)

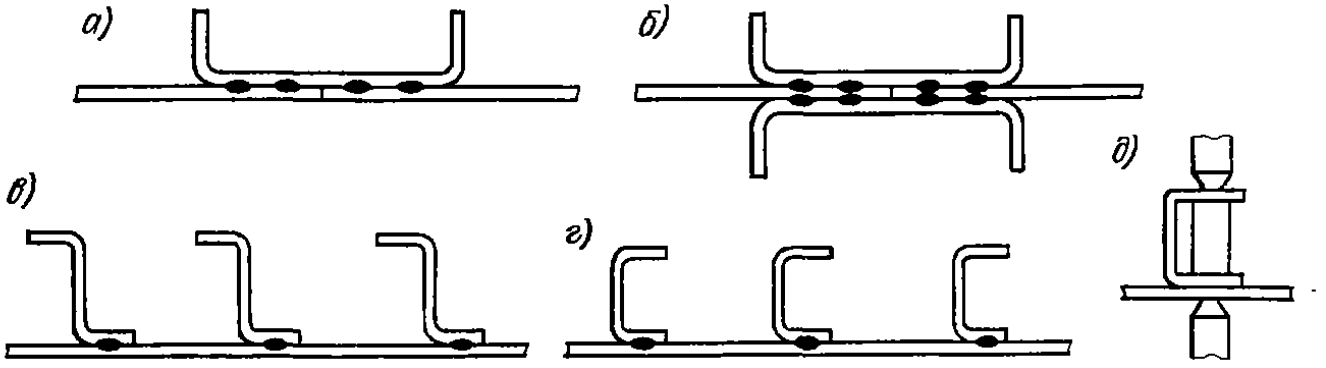


Рис. 4.18. Виды крупногабаритных точечно-сварных конструкций

Весьма распространены крупногабаритные многоточечные соединения листов со штампованными ребрами жесткости (рис. 4.18). Конструкции такого рода, значительно превышая по своим размерам рабочий сварочный контур машин, заставляют переходить на схемы односторонней двухточечной сварки (рис. 4.19, *б*, левая схема). Ниже на этом рисунке в укрупненном масштабе показана электрическая схема распределения токов по свариваемым деталям, которые обычно укладываются на столы с медными шинами в зоне действия токов (рис. 4.19, *в*). Как видно, сварочный ток здесь суммируется из трех слагаемых: 1) тока шунтирования $I_{1ш}$ в верхнем листе и потому не только бесполезного, но даже и вредного (из-за того, что немалый по своей величине он добавляет ненужную долю тепловыделения в переходных контактах электрод—деталь); 2) тока шунтирования $I_{2ш}$ во втором листе, свариваемого точку, и, следовательно, тока полезного; 3) тока $I_м$ в медной прокладке, составляющего часть тока свариваемого.

Все эти токи могут быть рассчитаны с использованием той же методики, какая была показана для токов шунтирования вообще. Для более наглядного представления соотношений перечисленных токов на рис. 4.20 показаны результаты опытных измерений этих токов для листов толщиной 2 + 2 мм (рис. 4.20, *а*) и 4 + 4 мм (рис. 4.20, *б*). В обоих случаях металл — Ст3. Расстояние между центрами точек 240 мм, ширина пластины $h = 150$ мм.

При одном и том же напряжении на электродах, вычитая из общего тока $I_м + I_{2ш} + I_{1ш}$ сумму $I_{1ш} + I_{2ш}$, можно видеть, что отводимая в медные прокладки доля вторичного тока все же невелика при сварке листов относительно большой толщины. При толщине 4 + 4 мм она меньше шунтирующего тока, протекающего в верхнем листе. Однако при сварке листов толщиной 2 + +2 мм медная подкладка заметно увеличивает эффективность нагрева металла. Для того чтобы практически полностью исключить бесполезное шунтирование, созданы хотя и немногочисленные, но специальные многоэлектродные машины двустороннего действия (правая схема на рис. 4.19, *б* и схема на рис. 4.19, *г*). В этом

случае токи шунтирования $I_{1ш}$ и $I_{2ш}$, направленные встречно, создают почти равные, но взаимно противоположно направленные падения напряжения на деталях. Происходит почти полная компенсация потенциалов. Токов шунтирования почти нет. Остаются и действуют небольшие уравнительные токи из-за неполного равенства падений напряжения. Для двустороннего действия многоточечные машины хороши как многократно повторяемые трехфазные сварочные трансформаторы: во вторичных контурах действует по три открытых фазы, обеспечивающих одновременную сварку шести точек.

До сих пор шла речь о точечной сварке таких открытых конструкций, когда ничто не препятствовало осуществлению рабочего хода верхнего электрода. Однако, как видно из конструкций, приведенных на рис. 4.18, такое технологическое благополучие удается не всегда. Для примера на рис. 4.21, *а* показано применение косого электрода, который может ставить точку, если его рабочий ход по крайней мере на 20—30 мм меньше высоты профиля. Если же такой разницы нет, то сваривание возможно при перевернутом положении деталей, согласно схеме рис. 4.21, *б*. В обеих этих схемах показаны реальные кривые электроды той действительной

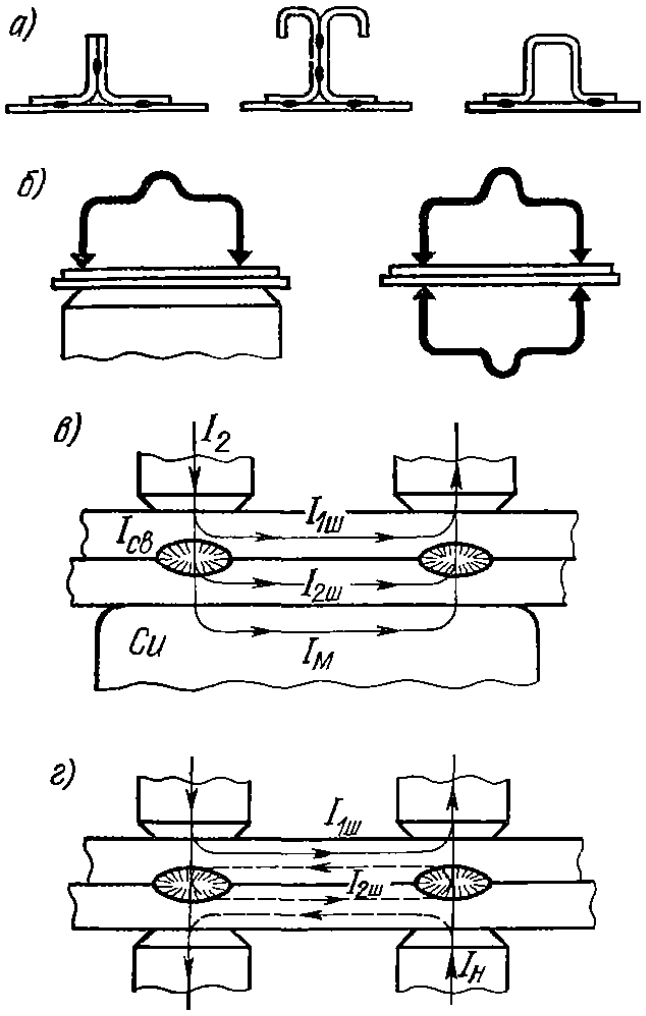


Рис. 4.19. Элементы крупногабаритных конструкций (*а*), схемы двухточечной сварки (*б*) и пути токов шунтирования в этих процессах (*в*, *г*)

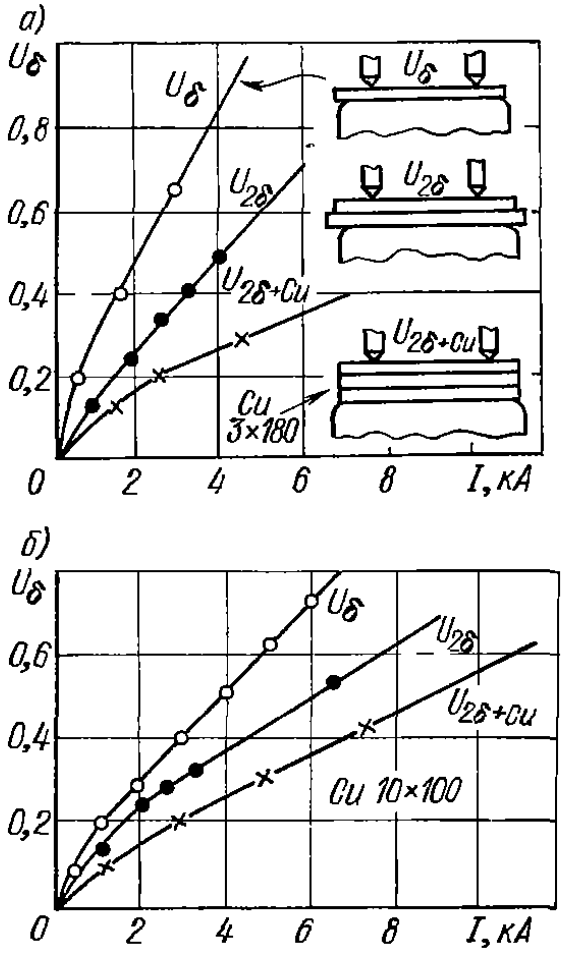


Рис. 4.20. Экспериментальные определения сопротивлений стальных холодных листов при двухточечной односторонней сварке ($U_б$ — напряжение между электродами)

формы, какую в некоторых условиях приходится видеть на производстве. На этом следует остановиться подробнее.

Условия работы электродного наконечника очень тяжелые, если идет нормальный процесс точечной сварки, а не ставятся единичные точки, по одной за несколько минут. Кривые электроды без внутреннего водяного охлаждения (рис. 4.21, *а*) лучше всего вообще не применять. Остается только один выход для всех конструкций, по виду сходных с рис. 4.18, *г* и *д* и им подобных. Нормальный процесс точечной сварки надо организовывать с электродами, конструкции которых показаны на схемах рис. 4.21, *в—д*. В этих системах обеспечивается и надежное охлаждение электродных наконечников, и возможность их использования в стесненных пространствах. В некоторых случах пространство может быть стеснено так, что даже и об электроде, как таковом, не может идти речь. Так, в частности, нижняя схема рис. 4.21, *д* советует проектировать сплошной плоский или сплошной цилиндрический электрод. Для них благодаря их массивности, необязательно стремиться подвести водяное охлаждение непосредственно к контакту электрод—деталь. В некоторых конструкциях (см. рис. 4.18, *д*) может оказаться рациональной одновременная сварка двух последовательно расположенных точек с использованием медной холостой вставки. Известны случаи, когда такая вставка делалась третьей фазой вторичного контура. Своеобразными конструкциями являются различные трубчатые или трубообразные сочетания. В этой области точечная или рельефная сварки могут оказаться или окончательными для готовой детали, или только сборочными для последующего завершения плотнопрочного соединения посредством шовной сварки. Схемы токоподводящих систем для трубчатых элементов рассмотрены в разделе шовной сварки.

Остановимся на некоторых типовых рельефно-сварных соединениях. Особое место среди них занимает приварка шпилек, стержней, болтов, гаек и других мелких элементов к крупногабаритным деталям. На рис. 4.22 приведено несколько типовых конструкций такого рода. Полезно вернуться к соединению, показанному на рис. 2.27, *а*. Речь обычно идет о приварке к стенкам различного рода шпилек, стерженьков и проволок, служащих крепежным элементом различных неметаллических наслоений, к металлическим поверхностям. Для такого рода крепежных элементов разрабатывались специальные установки дуговой сварки и искровой сварки разрядом конденсаторов. На основании многолетнего опыта можно сделать твердое заключение о том, что для проволочек диаметром от 1 до 5 мм наиболее рациональным является процесс электрической рельефной сварки по схеме рис. 2.27, *а*. Особенно важен факт полной возможности вести приварку проволок диаметром от 1 до 2,5 мм от передвижных трансформаторов пистолетами на гибком проводе с давлением от руки сварщика. Обязательная подготовка концов в виде полусферы обеспечивает прочнейшую приварку к поверхностям, не только покрытым ржавчиной и окалиной, но

даже не весьма засохшим судостроительным суриком. На рис. 4.22 показаны дополнительные варианты подготовки проволок для приваривания их к плоскостям (рис. 4.22, *а*). В некоторых случаях достаточно успешно привариваются стальные гвозди (рис. 4.22, *б*). Своеобразно привариваются ушки крепления к корпусам кокард и звездочек (рис. 4.22, *в*). Давление электродов и инерция системы давления должны быть малыми, не способными деформировать заготовку *1—2—3*. Поскольку инерция механизма сжатия мала, верхний электрод опускается с той же скоростью, с какой в первый момент деформируется дужка *1—2—3*. В следующий момент дужка вскипает, металл из области *1—2—3* выбрасывается и верхний электрод придавливает оставшиеся концы шплинта к изделию. Соответствующим образом необходимо подобрать импульс сварочного тока.

Приварку крепежных деталей более крупных размеров производят с использованием (рис. 4.22, *г*, *д*), как правило, кольцевых рельефов. В некоторых случаях рациональны прокладки в виде кольцевых шайбочек (рис. 4.22, *е*). Большой ассортимент возможных рельефно-сварных соединений рассмотрен в книгах [2, 10, 19]. Книжная, периодическая и каталожная литература хранит огромный рецептурный ма-

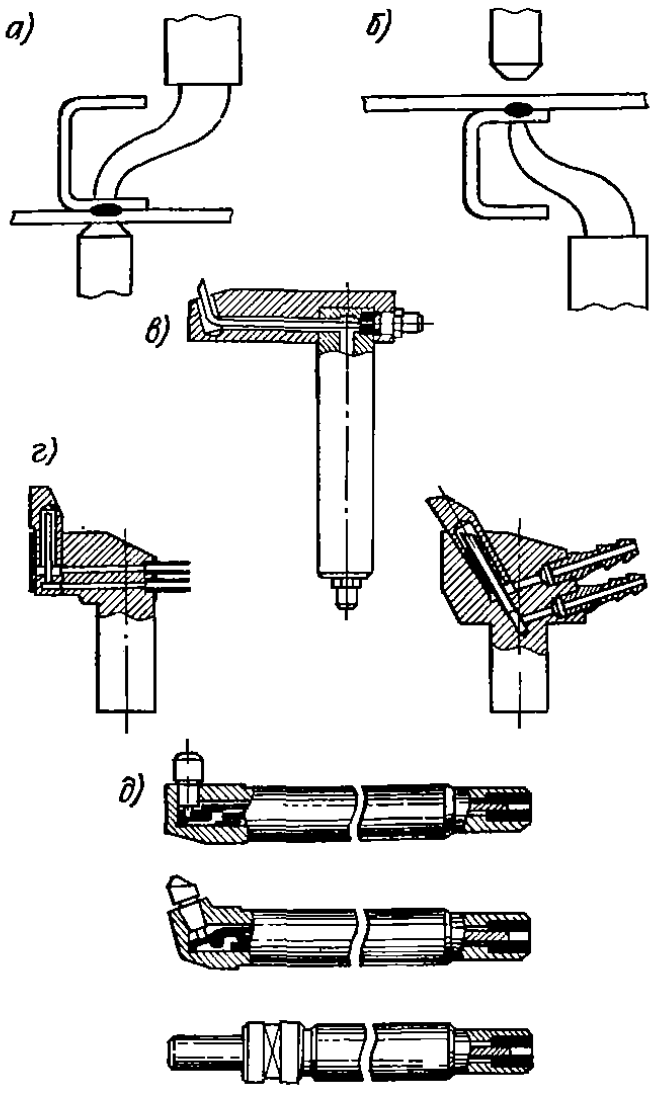


Рис. 4.21. Элементы конструкций с закрытой зоной точечно-сварных соединений и технологическая оснастка для их производства

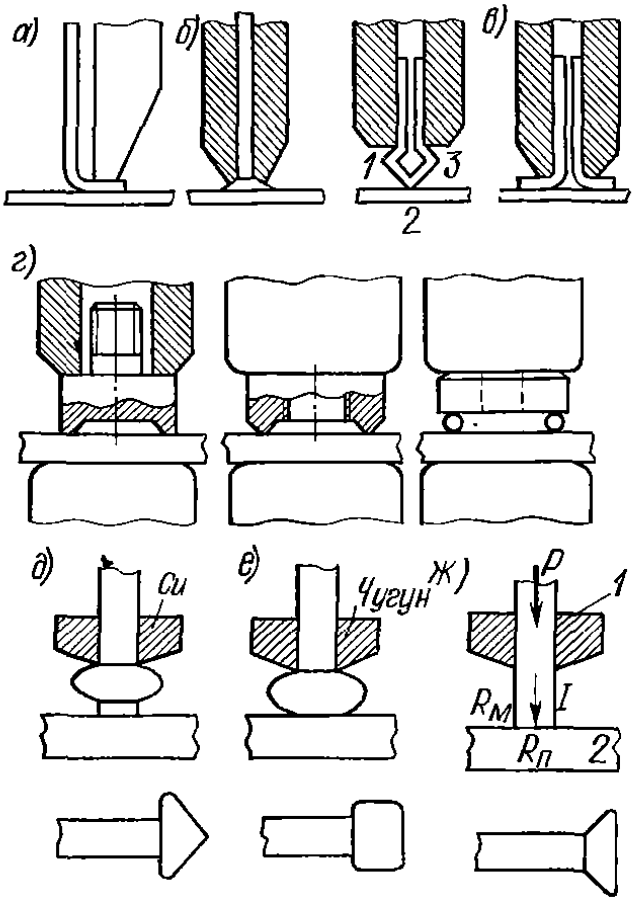


Рис. 4.22. Примеры конструкций некоторых электродов рельефных и точечных машин для сварки сложноштампованных деталей

териал по размерам рельефов, по конструкции рельефных сочетаний и режимам сварки. Для рельефной сварки справедливы такие общие выводы.

1. Какими бы ни были форма и размеры рельефов для сочетания плоских листов, рельеф должен дать сварную точку с расплавленным ядром диаметром $d_т$: именно по этому размеру и должны подбираться все режимные характеристики.

2. Различного рода торцевые или трубчатые соединения в большинстве случаев весьма отличаются от формы и размера сварной точки. Это лишает возможности вести расчеты, пользуясь формулой (1.85). Приближенные расчеты можно производить на основе формул типа (4.21), (4.23) и им подобных, которые определяются законом (4.19).

3. Режим сварки рельефов по току независимо от того, о каких рельефах идет речь, как и для точечной сварки, будет иметь допустимый минимум и предельный максимум, при котором рельеф будет склонен не к плавлению, а к выплеску перегретого металла.

Известна весьма своеобразная технология создания различного рода рельефов, утолщений и вообще формоизменений на стержневых заготовках (рис. 4.22, *ж*). Если стержень, зажатый в подвижную губку *1* и свободно контактирующий с неподвижной деталью *2*, сжимать под током, то при известном соотношении P, I и времени их действия на конце стержней можно формировать различные фигуры. Медная охлаждаемая губка создает на конце цилиндрический выступ (вторая позиция по рис. 4.22, *ж*). Неохлаждаемая губка из жаропрочного чугуна (кривая фигура) создает сферическую или эллипсоидальную бульбу. Подбирая материал и конструкцию губок, удается (нижняя фигура на рис. 4.22, *ж*) получать довольно разнообразные формы рельефов и утолщений на концах стержней. Известны примеры электровысадки не только торцевых, но и серединных зон круглых стержней.

За последние годы точечно-сварные конструкции стали создавать из биметаллических листов и профилей. Биметалл, в частности, создается из алюминиевых сплавов с титановой прокладкой. На рис. 4.23, *а* показана схема биметаллического точечно-сварного соединения. Структура его несколько своеобразна. Как видно, в расплавленном ядре алюминиевого сплава полностью сохраняется нетронутой титановая прослойка (рис. 4.23, *а*). С помощью рис. 4.23, *б* можно рассмотреть электротепловой баланс всей многослойной системы. Как было показано ранее, для зоны контакта исследовалась формула (1.39)

$$T_к = \frac{qt}{4m\sqrt{\lambda\gamma c}\, S\sqrt{t}}. \qquad (4.27)$$

В данном случае в зоне свариваемого контакта действует энергия qt из двух источников: тепловыделения за счет электрического сопротивления титановой прослойки и сопротивления кон-

такта листов из алюминиевого сплава. Для упрощения сравнительных расчетов примем, что ток между электродами проходит по свариваемым деталям, по цилиндрическому каналу диаметром $d_т$ (рис. 4.23, *б*). Соответственно этому

$$qt = I^2 (r_{Al} + R_{Ti}) t,$$

где r_{Al} — это та же самая величина $r_т$ из формулы (1.85), в которой значение удельного сопротивления $\rho_т$ в момент расплава обозначаем через ρ_{Al}. Тогда, обозначая удельное сопротивление горячего титана при температуре около 650 °С через ρ_{Ti}, можем написать для qt

$$qt = I^2 \left(\frac{4\rho_{Al} h_{Al}}{\pi d_т^2} + \frac{4\rho_{Ti} h_{Ti}}{\pi d_т^2} \right) t.$$

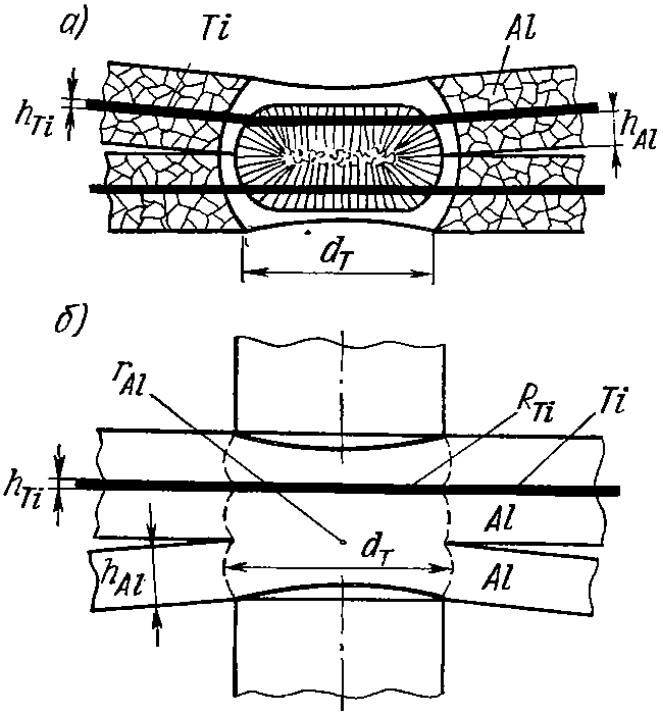


Рис. 4.23. Схема точечно-сварного соединения из биметалла алюминиевого сплава с титаном

Соотношение этих двух слагаемых сопротивлений к моменту выключения тока при $\rho_{Ti} = 150$ мкОм·см и $\rho_{Al} = 10$ мкОм·см таково:

$$\frac{\rho_{Al} h_{Al}}{\rho_{Ti} h_{Ti}} = \frac{10 h_{Al}}{150 h_{Ti}}.$$

Все зависит от соотношения толщин. Практически делают $h_{Al} \approx 5h_{Ti}$. Следовательно, титановый источник теплоты даже при одной прослойке оказывается по крайней мере в 3 раза более интенсивным, чем источник теплоты свариваемого контакта. В связи с этим становится понятной структура сварного соединения, характеризуемая тем, что алюминиевый сплав доводится до точки плавления за пределом титановой прослойки, близко подходя к плоскости контакта электрод—деталь. Имея в виду изложенные соображения для сварки биметаллических листов рассматриваемого типа, технологический критерий подобия по формулам (1.47) и (2.84) приходится записывать в следующем виде:

$$K = \frac{I^2 (\rho_{Al} h_{Al} + \rho_{Ti} h_{Ti}) \sqrt{t}\, \sigma_{Al}}{T_{пл} d_т \sqrt{(\lambda\gamma c)_{Al}}\, \sigma_{Al} P}, \qquad (4.28)$$

где ρ_{Al} — удельное сопротивление алюминиевого сплава в момент плавления; h_{Al} — высота расплавленного ядра алюминиевого сплава; ρ_{Ti} — удельное сопротивление титана при температуре плавления алюминиевого сплава; h_{Ti} — толщина (одной или двух титановых прослоек; σ_{Al} — предел текучести холодного алюминие-

вого сплава; $(\lambda\gamma c)_{Al}$ — коэффициент аккумуляции теплоты алюминиевого сплава; δ_{Al} — толщина листа алюминиевого сплава.

Формула (4.28) дает понятие о том, как строить критериальную связь для различных биметаллических сочетаний и разных сочетаемых пластин.

4.5. Технологическая оснастка сварочных контуров точечных и шовных машин

Технологическая оснастка сварочных контуров выполняет задачу не только механического закрепления и перемещения деталей, но также и подвода сварочного тока к ним. Для этого технологическая оснастка должна обеспечивать также два основных действия:

1) подвести к зоне сварки сварочный ток и обеспечить изменение его величины по заданной программе:

2) создать (также по программе) сжатие свариваемых деталей.

Из этих определений выпадают механические системы зажимного и сборочно-захватывающего типа, а также особые механические системы перемещения деталей относительно неподвижных машин или движения машин вокруг крупногабаритных изделий, также не связанные с действием сварочного тока и сварочного давления.

Система подвода сварочного тока к точечно- и шовно-сварным соединениям конструктивно заметно различаются. Электрододержащая система много проще, чем роликоподвижная, несмотря на то что каждая из них по-своему может создавать и одноточечные, и многоточечные соединения. Оставляя пока в стороне механизмы привода роликов, с помощью рис. 4.24 остановим внимание технологов на типовых примерах точечной и шовной сварки трубчатых конструкций из тонкостенного металла. По схемам, показанным на рис. 4.24, *а*, *б*, может быть создан лишь ограниченный ассортимент труб или обечаек. Длина их не больше $2L$, а диаметр D явно больше конструктивного габаритного размера B токоведущей консоли. Двойная длина L при этом может быть обеспечена только посредством сварки всего шва в два приема, с поочередным свариванием от середины к каждому концу. Обе схемы (рис. 4.24, *а* и *б*) страдают сильнейшим недостатком, если вспомнить картины распространения плоского и кольцевого магнитных полей [(см. формулы (2.41) и (2.43)]. Схема, приведенная на рис. 4.24, *в*, когда изделие находится вне сварочного контура, устраняет влияние металла изделия на индуктивность. Однако левая фигура относится к сварке с отбортовкой, которая во многих случаях нежелательна. Правая фигура показывает вообще нереальный вариант, если внутри трубы не располагаются какие-либо упорные вкладыши, способные противостоять деформации трубы и обеспечить необходимое сварочное давление. С этой точки зрения схемы, показанные на рис. 4.25, намечают правиль-

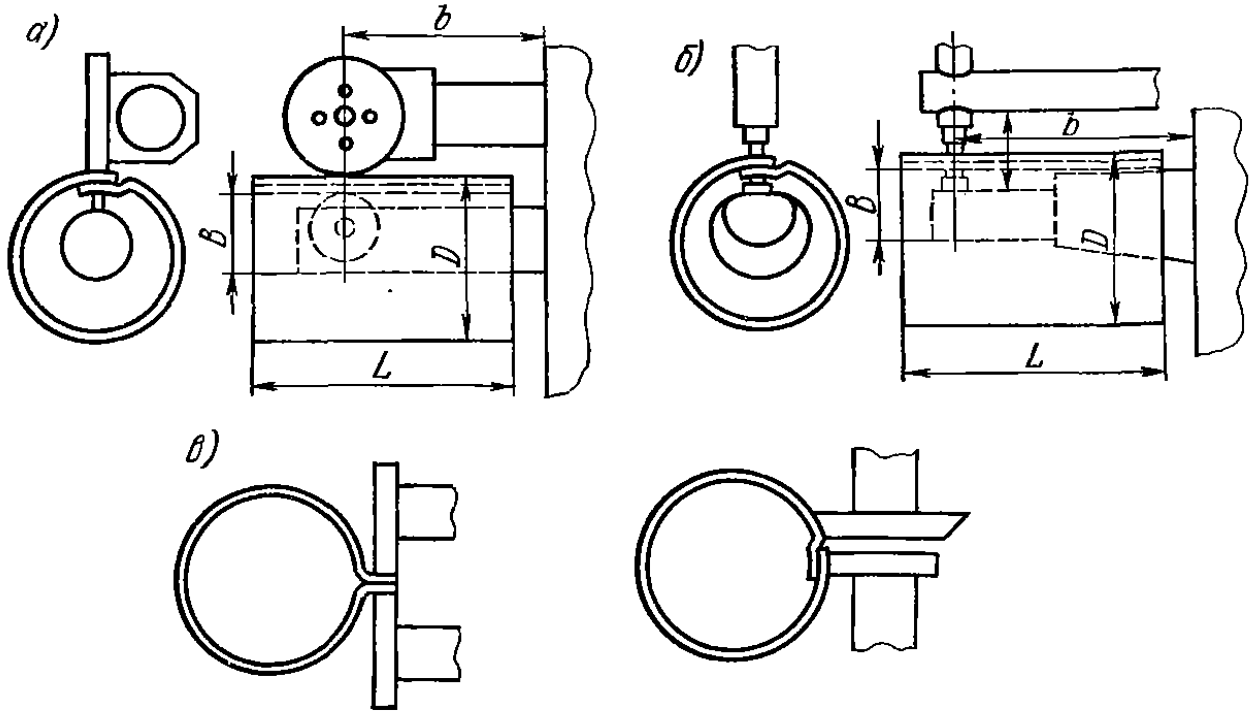


Рис. 4.24. Схемы сварочных контуров шовной (*а*) и точечной (*б*) машин, а также схема создания точечных или шовных сварных соединений при изготовлении тонкостенных трубчатых элементов небольшой длины

ные пути изготовления труб. Для малых диаметров труб внутренние вставки (рис. 4.25, *а*) могут быть сплошными медными, для больших — составными облегченными. На рис. 4.25, *б* показаны расчетные схемы действующих между электродами электрических сопротивлений. Здесь *1*, *2* — сопротивления переходные, *3* — сопротивление растекания тока по металлу трубы ($I_д$ — ток, текущий в детали, $I_м$ — в медной вставке), *4* — прямое сопротивление вставки, если она сплошь электропроводная. Сопротивление *3* можно рассчитывать так, как это было показано для ветвей шунтирования [(см. формулы (2.34), (2.38)].

На рис. 4.25, *в* показаны особые схемы изготовления тонкостенных вентиляционых труб. Здесь *1*, *2* — токоведущие электроды сборочных точечных машин или ролики шовных, сваривающих. Внутри трубы находится медная вставка *3*. Особенно рациональна правая схема на рис. 4.25, *в*. В ней *1*, *2* — токоведущие ролики, *3*, *4* — удерживающие и *5* — изоляционная вставка небольшой массы. Обе схемы, приведенные на рис. 4.25, *в*, характеризуются тем, что их досварочная сплюснутая форма после сварки внутренним давлением превращается в нормальную цилиндрическую, а в некоторых случаях — в любую другой формы. В зависимости от конструкции свариваемых изделий шовные машины могут создавать поперечные швы (рис. 4.26, *а*) или продольные (рис. 4.26, *б*). Швы первого типа практически могут быть любой протяженности. Для трубчатых конструкций принципы наложения поперечных круговых (*а*) и продольных (*б*) швов иллюстрируются схемами, показанными на рис. 4.27. Особого типа швы с отбортовкой на неподвижных конструкциях производятся с помощью подвесных

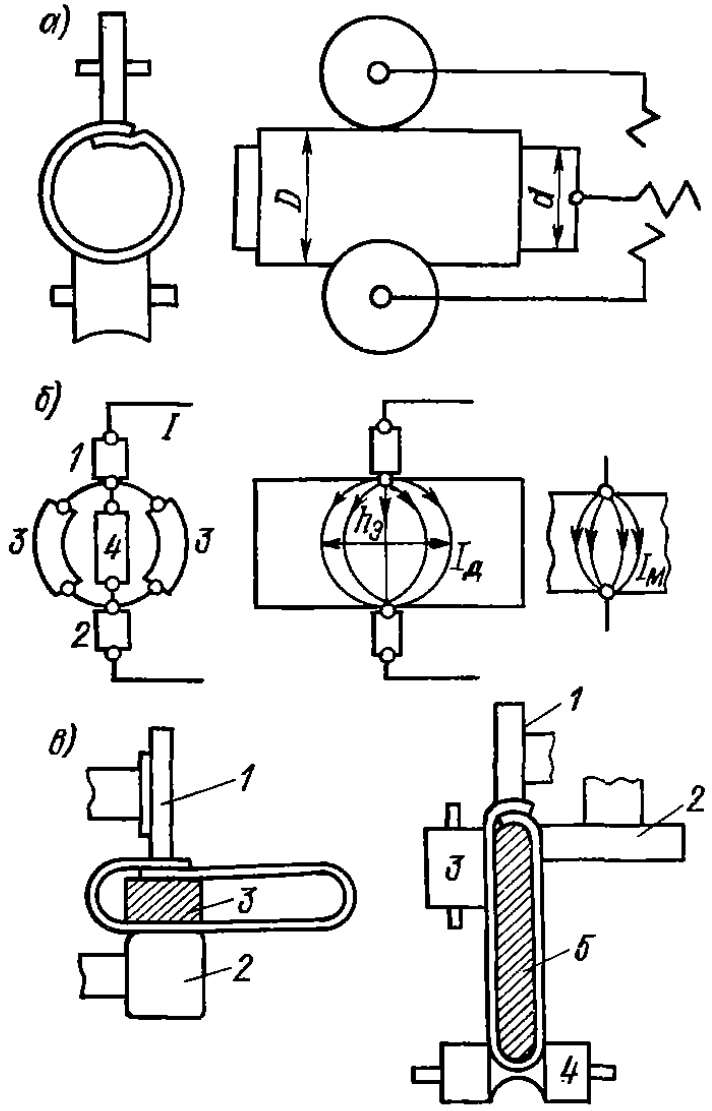


Рис. 4.25. Технологические приемы сварки трубчатых элементов из тонколистового металла

машин (рис. 4.28). Подвод тока к сваривающим роликам обеспечивается здесь гибкими проводами с малой индуктивностью. Вращение роликов создается гибким валом.

На рис. 4.29 показан принцип наложения точечных и шовных соединений на крупногабаритную конструкцию с использованием подвесных машин.

Главными инструментами, обеспечивающими создание точечно-сварных соединений, являются электроды, а шовно-сварных — ролики. Этим деталям сварочных машин посвящено много книг. Условия работы этих чисто электромеханических инструментов очень тяжелые: сила сварочного тока — десятки тысяч ампер; нагревы наконечников — до 400—700 °С, контактные поверхности покрываются весьма заметными оксидными наслоениями, преимущественно CuO и Cu_2O. Электрофизические процессы в переходных контактах электрод—деталь или ролик—деталь еще более сложны, чем в свариваемых

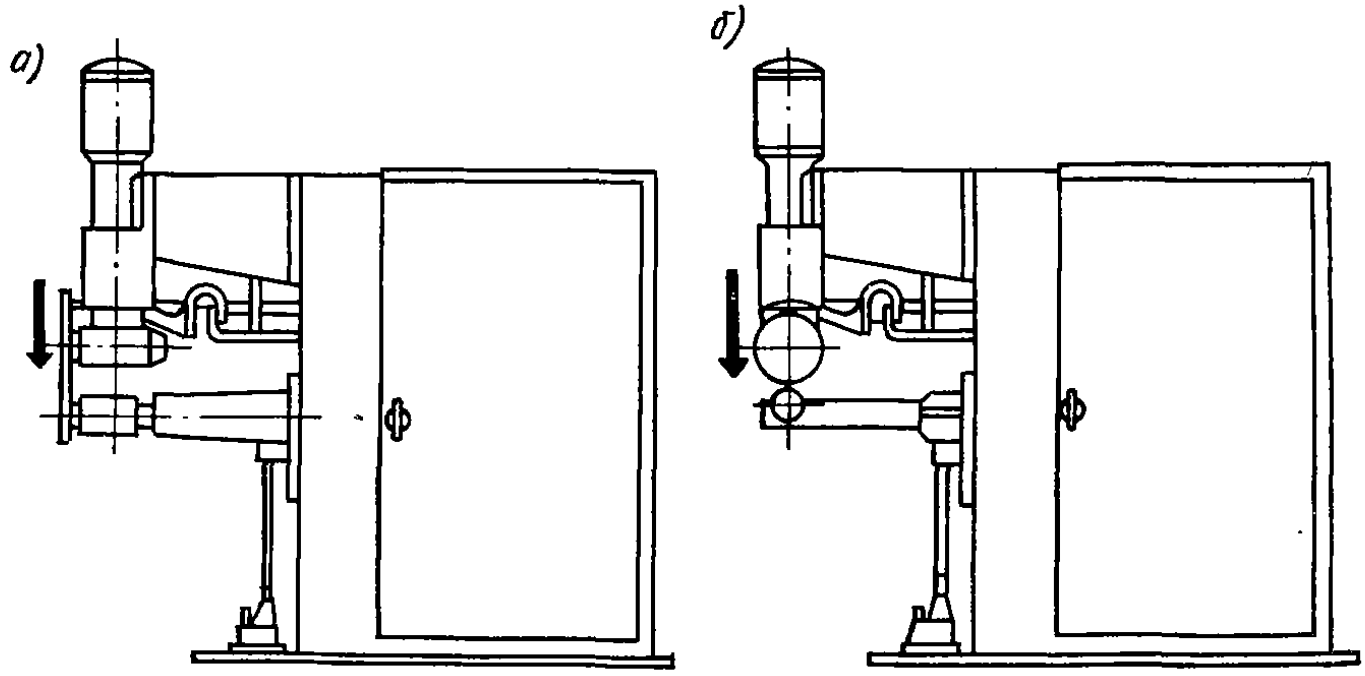


Рис. 4.26. Основные типы шовных машин

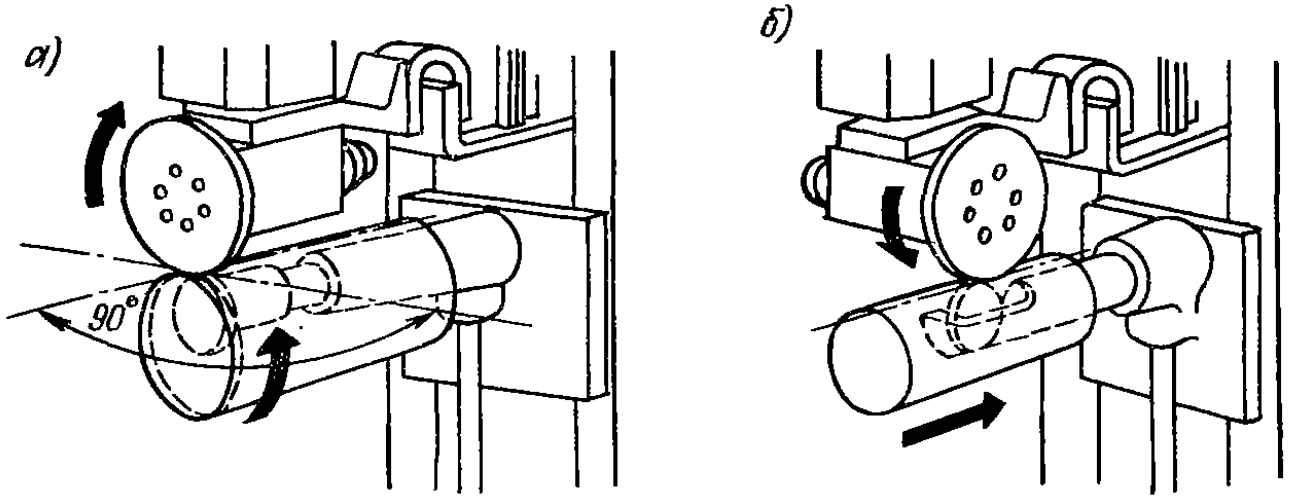


Рис. 4.27. Конструктивные схемы сварочных контуров шовных машин

контактах. Электрические параметры свариваемого контакта содержат много разного рода неопределенностей до включения тока. В переходном же контакте все многообразие электрофизических процессов сохраняется в течение полного периода сварки. Для стабилизации электротепловых режимов сварки в любых заводских технологических инструкциях предусмотрены обязательные рекомендации периодической механической обработки и электродов, и роликов. Операции этого рода предусматривают восстановление геометрии и зачистку заметных слоев оксидных

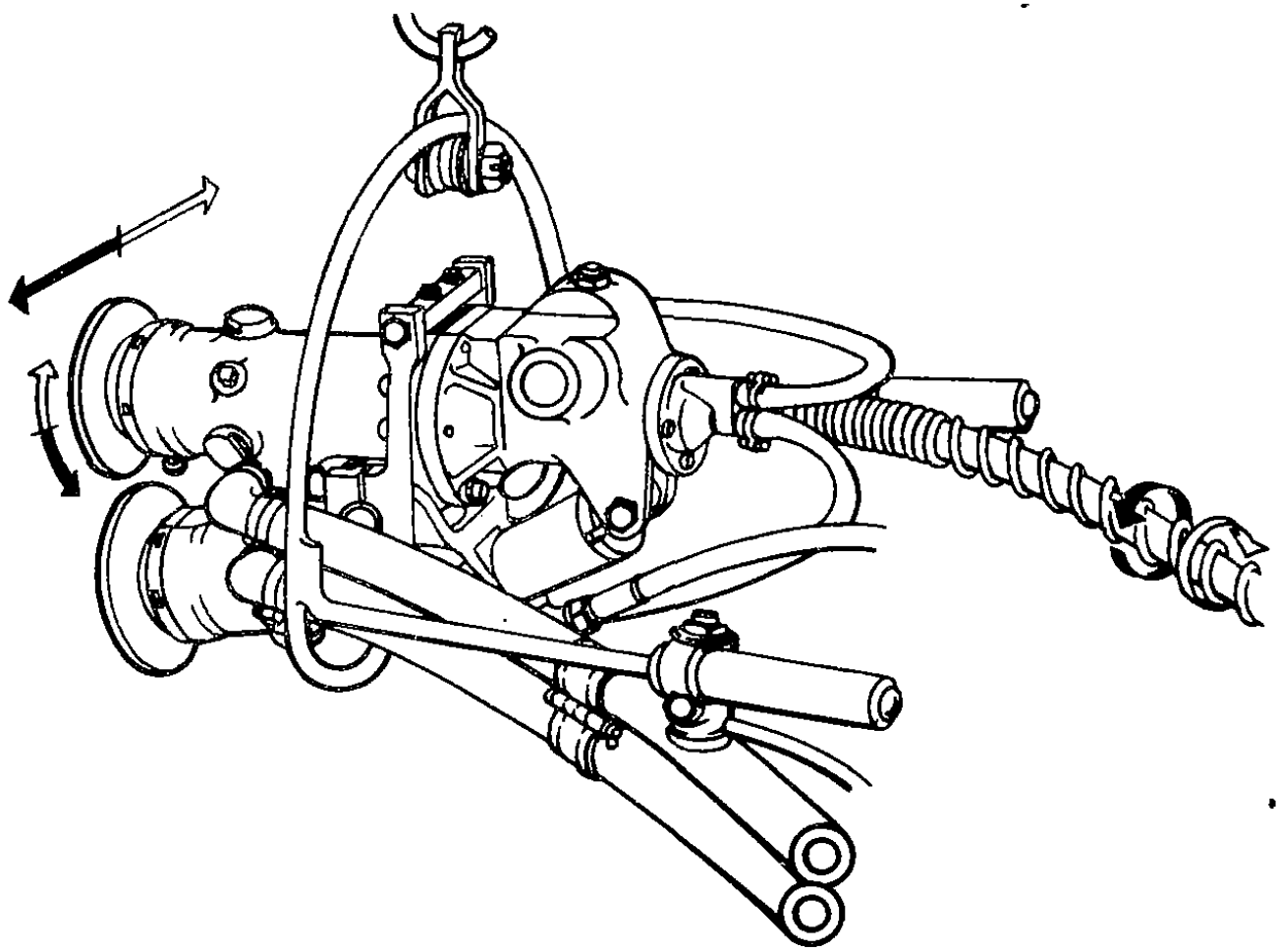


Рис. 4.28. Конструктивная схема подвесной шовной машины

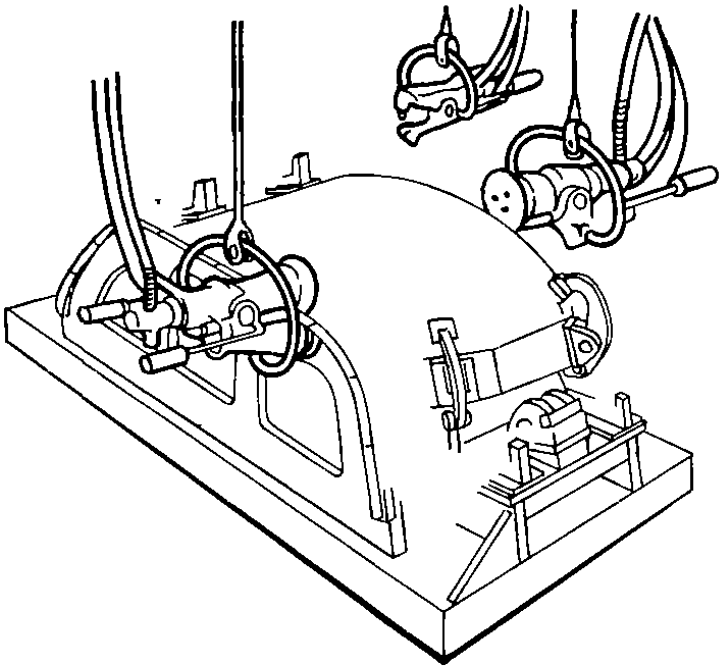


Рис. 4.29. Пример расположения подвесных точечных и шовных машин относительно неподвижного крупногабаритного изделия

пленок на контактных поверхностях. Пленки могут значительно увеличивать электрические сопротивления переходных контактов. Удельное сопротивление CuO (ρ, Ом·см), измеренное в массе этого вещества, характеризуется такими числами:

При 15 °С .	100—1000
» 700 °С .	5
» 1000 °С .	0,1

Для тонких пленок удельное сопротивление имеет еще бóльшую величину и к тому же довольно неопределенную, поскольку способы создания тонких пленок весьма разнообразны. Воспользуемся приведенными числами для некоторых вероятностных расчетов. Свежезачищенные электроды или ролики после постановки малого числа точек сохраняют на плоскостях контактирования цвет меди. Это значит, что оксидные пленки на меди могут считаться оптически прозрачными. Толщина таких пленок не более $300 \cdot 10^{-8}$ см. Определим электрическое сопротивление пленок в контакте с идеально чистым свариваемым металлом при площади контакта 1 см^2

$$R = 300\rho 10^6/(10^7 \cdot 1) \text{ мкОм}.$$

Тогда сопротивление холодного контакта составляет 300—3000 мкОм, при температуре 700 °С — 15—150 мкОм, а при 1000 °С —0,3—3 мкОм. Холодный контакт обладает таким высоким сопротивлением, что при низком сварочном напряжении вообще невозможно, казалось бы, прохождение тока через этот контакт. Однако ток проходит, и это вполне объяснимо.

Самое главное различие свариваемого и переходных контактов — это их динамичность. Давление электродов точечных машин — это фактически ударное давление. Давление роликов шовных машин, если и не ударное, то уж во всех случаях сдвиговое. Выше, в п. 1.3, было показано, что ударное или сдвиговое контактирование обязательно обеспечивает импульсную вспышку довольно высоких температур в отдельных точках. Следовательно, в этих точках электрическое сопротивление оксидной пленки резко падает, причем настолько, что она становится проводящей. К сожалению, этот высокотемпературный импульс очень быстро гаснет, не дождавшись включения сварочного тока. Таким обра-

зом, чисто термическая активация оксида ничем не способствует прохождению сварочного тока. Однако напомним о явлении экзоэлектронной эмиссии. Отличительной особенностью ее от весьма изученной термоэлектронной является то, что экзоэлектроны после активации поверхности эмиттируют очень долго (минуты и даже десятки минут). Термионная же эмиссия гаснет сразу после охлаждения эмиттирующей поверхности. Практика применения точечной и рельефной сварок показала, что электродные поверхности в большинстве случаев зачищают настолько редко, что они покрываются стойкими оксидными пленками толщиной до 0,2—0,3 мм. Ни о какой оптической и электрической прозрачности в таких условиях не может быть и речи. И тем не менее ударное и сдвиговое контактирование создает экзоэлектронную эмиссию непрерывно. Это значит, что все микропространство по плоскости контакта представляет собой плазменную среду с проводимостью, вполне обеспечивающей прохождение сварочного тока при низком напряжении и по любой его программе. Работа выхода электронов из чистой меди и ее оксидов практически одинакова: для меди это 4,5 эВ, для оксидов CuO и Cu_2O — от 4,35 до 4,9 эВ. Следовательно, в контакте необязательно прорываться «медному» электрону через слой оксида. «Оксидные» электроны при той же работе выхода сами обеспечат в зазоре состояние плазмы и проводимость контакта. Рассмотренная картина проводимости говорит о том, что самым важным условием стабильности сварочного режима является стабильность геометрии и размеров электродов и роликов шовных машин.

Электродным материалам и конструкциям электродов посвящено много работ [2, 19]. Не повторяя в этой книге общеизвестных вещей, обратим внимание на основные особенности службы электродов. При плотностях тока через наконечники в сотни тысяч ампер на квадратный сантиметр и при нагревах наконечников выше температур рекристаллизации электроды из чистой меди служат плохо, утрачивая заданную форму через один-два десятка точек. В связи с этим для электродов рекомендуются некоторые медные сплавы. Этот ГОСТ не препятствует созданию новых материалов для электродов в целом или только для наконечников, которые могут соединяться с конической частью корпуса различными способами. Исследования Ю. Г. Величко и Б. В. Федотова из ЛПИ им. М. И. Калинина показали, что весьма перспективными электродами являются биметаллические. Рабочая часть из различных бронз, стойких к механическим нагрузкам при повышенных температурах, приваривается трением к корпусной части медного электрода. Медный корпус обеспечивает интенсивное охлаждение рабочего наконечника, обладающего высокой механической стойкостью. Система внутреннего водяного охлаждения сохраняется обычной. В целом стойкость биметаллических электродов, изготовленных сваркой трением, увеличивается. Сварка трением обеспечивает равнопрочность соединения, равную целому

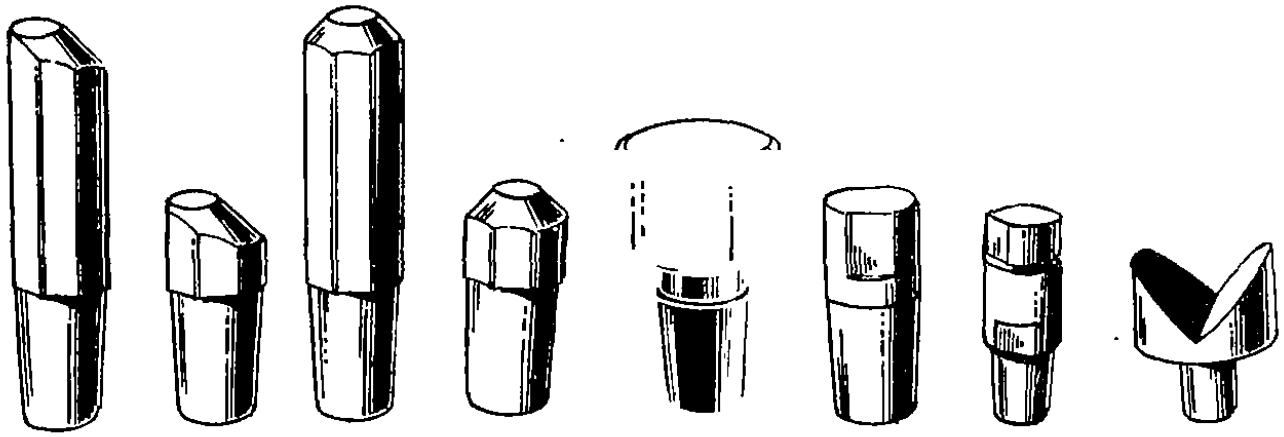


Рис. 4.30. Типовые формы электродов точечных машин

электроду. Этот факт позволяет использовать многократную заточку наконечников любыми инструментами.

На рис. 4.30 показана группа типовых свежезаточенных электродов точечных машин. К сожалению, в условиях производства такая идеальная внешность электродов сохраняется недолго. Наконечник невозможно восстанавливать ежеминутно и ежечасно, и он приобретает грибообразную форму и диаметр, превышающий иногда первоначальный более чем в 1,5 раза. В связи с таким формоизменением происходит следующая картина. Увеличение контактной площади электрода и изделия снижает механическое давление на свариваемый контакт, в результате чего его сопротивление несколько падает. Сила сварочного тока от этого эффекта не зависит и сохраняется той же самой. Следовательно, интенсивность тепловыделения все же уменьшается за счет контактного сопротивления. Диаметр сварной точки получается за счет контактного сопротивления. Диаметр сварной точки получается меньше заданного. К счастью, слишком большому понижению активного тепловыделения в значительной мере препятствует эффект магнитного сжатия линий сварочного тока. Как бы ни расплющивался электродный наконечник и как бы ни становилась большой площадь его контактирования с металлом, магнитное давление, согласно формуле (2.7), будет оказывать значительное сопротивление растеканию плотности тока по переходной плоскости. Таким образом, главной причиной нарушения режима при сварке изношенным электродом является снижение механического давления на свариваемый контакт. Следует иметь еще в виду, что изношенности электродного наконечника сопутствует и формирование на нем оксидной пленки недопустимо большой толщины.

4.6. Прочностные свойства точечно-сварных соединений

Электрическая контактная точечная сварка появилась как заменитель пайки и клепки при изготовлении мелких деталей главным образом бытового назначения. Однако уже в 1920-х годах благодаря необычайной высокой производительности точечная

сварка стала широко применяться в массовом производстве крупногабаритных изделий. В первую очередь это оказалась автомобильная промышленность, а вслед за ней и другие отрасли, продукция которых ориентировалась на понятия прочности при различных сложнонапряженных состояниях. Только тогда, когда точечная сварка оказалась технологически единственно возможной, стали заниматься исследованием ее прочностных свойств.

Как и было отмечено выше, при исследовании одноточечных соединений пришлось примириться с концентрациями напряжений. Не лучше дело обстояло и в многоточечных конструкциях. Возвращаясь к рис. 4.17, необходимо обратить внимание на то, что в продольном (относительно действия силы) направлении крайние точки оказываются нагруженными больше, чем средние. В этом отношении соединения контактные многоточечные, многозаклепочные и дуговые с фланговыми швами качественно полностью идентичны. Различия только в степени концентрации напряжений. В частности, для трехточечного соединения две крайние точки перегружены относительно средней сравнительно немного — на 10—12 %. В четырехточечном эта перегрузка доходит до 50 %, в пятиточечном — средняя точка воспринимает иногда только пятую часть нагрузки крайних. Перегрузки такого рода стимулируют конструкторов создавать конструкции, подобные приведенным на рис. 4.17, *г* или *д*, в которых резкие концентрации нагрузок на отдельные точки устраняются.

Все сказанное о распределении нагрузок относится к статическим испытаниям. Разумеется, при ударных и вибрационных нагрузках все виды концентраций сохраняются и даже усиливаются. Имеются многочисленные опытные данные по показателям вибрационной прочности. Из них можно вывести приблизительно такие соотношения. Одноточечные соединения при вибрационных испытаниях на растяжение — срез дают только 8—10 % от прочности при статическом разрыве. Многоточечные соединения при многорядном расположении точек и на металле малых толщин (0,3—1 мм) практически обеспечивают прочность, равную целому металлу, если говорить о конкретных конструкциях, а не о лабораторных испытаниях на вибрацию. Этот факт отлично доказывается службой всех точечно-сварных соединений, самых разнообразных по расположению точек, в корпусах всех автомобилей. Любые аварийные разрушения корпусов, даже старых машин с большим пробегом, всегда происходят по целому металлу, а не по сварным точкам. Мало того, диски всех колес автомобилей «Москвич», «Жигули» и «Волга» соединены с ободом единичными точками в один ряд при числе по окружности не более 12. Эти сварные соединения, много лет работающие в условиях реальной ударной и вибрационной нагрузок, никогда не выводят колеса из строя в результате разрушения сварных точек. Точечная сварка глубоко внедрилась в вагоностроение, где толщина свариваемых

стальных элементов 2 + 2 и 2 + 3 мм, а расположение точек не групповое, а последовательно единичное.

Таким образом, получая сравнительно невысокие прочностные показатели на лабораторных образцах, нельзя приходить в отчаяние, думая о применении точечно-сварных соединений в крупногабаритных конструкциях. Целая конструкция, в которой точечно-сварные соединения являются единственными ее связующими, оказывается весьма выносливой в реальных условиях ее службы.

Тем не менее, для авиационных и ракетных конструкций, в которых аварийные запасы прочности отдельных узлов предусматривают повышенными и для которых важнее понятия не прочности, а надежности, для таких узлов создаются комбинированные клеесварные соединения. Технология и прочностные свойства такого рода соединений весьма полно представлены в книге В. Н. Шавырина и В. И. Рязанцева [20]. Весьма примечательна сравнительная картина прочности на срез, которую получили В. И. Рязанцев, В. А. Федосеев и Н. И. Абин для точечно-сварных и клеесварных соединений из дюралюминия Д16Т. При диаметре точки 3 мм клеесварные соединения прочнее почти в 3,5 раза, при $d_т = 7{,}5$ мм — в 2 раза. В таком же приблизительно соотношении растет и вибрационная прочность. Практически клеесварные соединения обеспечивают показатели прочности, равные целому металлу при испытании лабораторных образцов и отдельных узлов конструкций.

В подавляющем большинстве точечно-сварные конструкции создаются как нахлесточные. Прочностные показатели таких соединений представлены в табл. 7 приложения.

Глава 5

ТЕХНОЛОГИЯ ШОВНОЙ СВАРКИ

5.1. Формирование соединений при контактной шовной сварке

Сварной шов, созданный между роликами шовной машины, не может рассматриваться как элементарный ряд последовательных точек, какие создаются электродами точечных машин. Различия здесь (и в отношении распространения тока и выделения теплоты, и технологические) довольно существенны.

На рис. 5.1, *а* показана схема структуры металла отдельных точек, которые ставились посредством вращающихся роликов на шовной машине. Геометрия ядра, как видно, ощутимо отличается от формы ядра единичной сварной точки. При вращении ролика под током получается своеобразный эффект шунтирования, когда ток как бы непрерывно тянется к только что созданной им отдельной точке. Распределение тока по свариваемой детали для

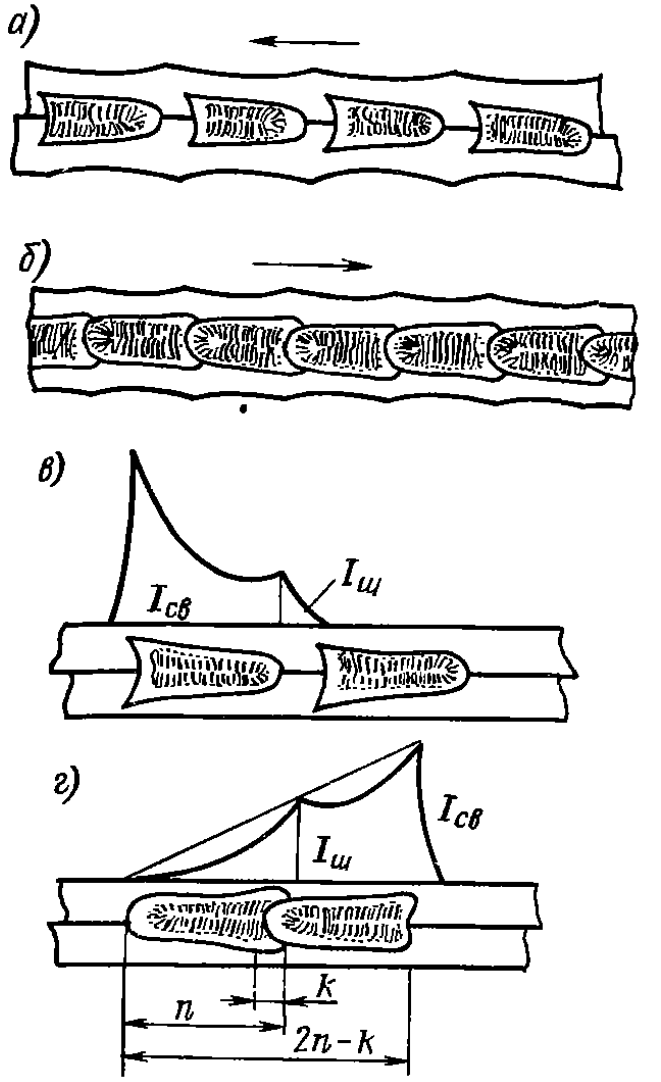


Рис. 5.1. Схема структуры шовно-сварного соединения (неплотного шва *а* и плотного *б*) и распределения тока по свариваемым деталям (для неплотного шва *в* и плотного *г*)

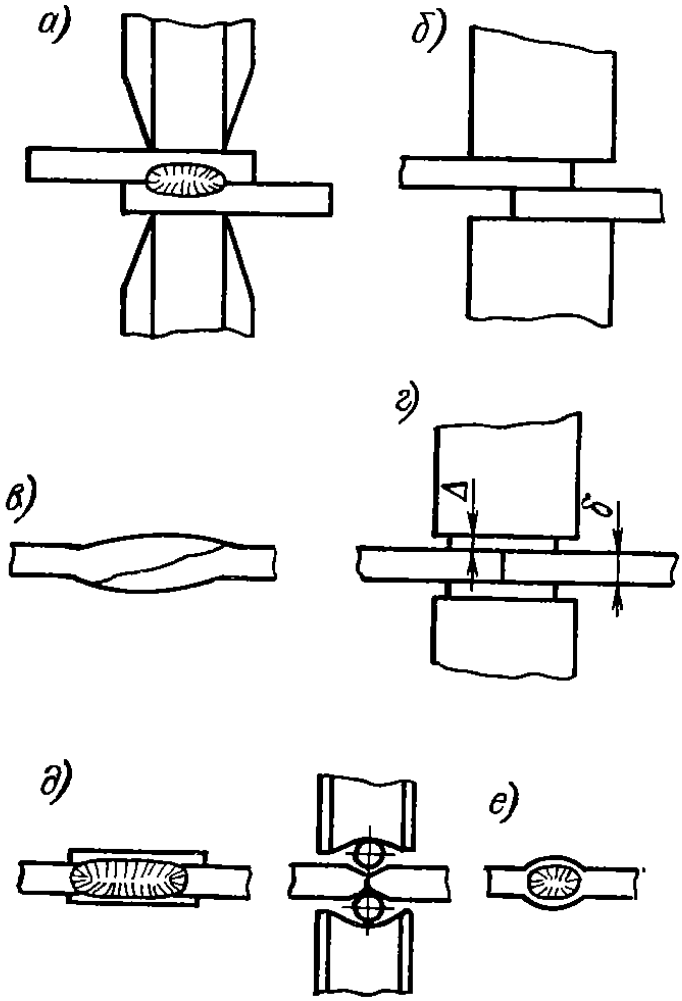


Рис. 5.2. Типовые шовно-сварные соединения

структурной картины, представленной на рис. 5.1, *а*, показано эпюрой на рис. 5.1, *в*. Общая сила тока здесь разделена на ток сваривающий $I_{св}$ и ток шунтирующий $I_ш$. Эффект концентрации этих токов на концевых участках его коммутации подчеркнут некоторыми пиковыми значениями.

Если рационально сочетать для непрерывного вращения роликов время включения $t_ш$ и время паузы между включениями, то обеспечивается перекрытие любого размера предшествующей точки каждой последующей. Этот самый распространенный цикл шовной сварки показан на рис. 5.1, *б* и *г*. На последнем эпюра токов представлена к моменту его выключения после расплавления второй точки. Эпюра этих же токов в момент включения тока для плавления второй точки была изображена на рис. 2.30.

Самым основным и, так сказать, классическим типом шовно-сварного соединения является нахлесточный шов (рис. 5.2, *а*). Уже только одна его форма убедительно говорит о крайней ограниченности толщин деталей, свариваемых таким образом. Самой распространенной следует считать толщину металла от 0,5 до 2 мм; предельно допустимая толщина 3 мм, и то чаще не в виде нахлес-

точных, а в качестве шовно-стыковых соединений по типу рис. 5.2, *б*, *г* и весьма редко 5.2, *д*. Такого рода ограничение вполне понятно из элементарных прочностных соображений. Нахлесточные соединения даже толщиной 2 мм по прочностным свойствам не могут конкурировать с соединениями стыковыми, которые отлично могут быть обеспечены аргонодуговой, плазменной или даже дуговой сваркой в атмосфере CO_2. Металл толщиной 2—3 мм подвергается шовной сварке главным образом для создания конструкций, обязанных гарантировать высокую плотность, но не прочность, равную целому металлу.

Модель шовно-стыкового соединения по рис. 5.2, *б* дает раздавленный косой шов (рис. 5.2, *в*), обычно богато насыщенный оксидными включениями. Своеобразен тип соединения, показанный на рис. 5.2, *г*. Его прочностные свойства более высоки, чем те, что представлены на рис. 5.1, *б*. Здесь могут быть использованы два варианта: привариваюшиеся подкладки того же самого металла толщиной Δ, несколько меньшей, чем δ, или тонкая лента из неприваривающейся фольги. Первый вариант используют значительно чаще, поскольку он создает равнопрочное соединение, если полностью не удалять приваренные накладки. Вариант с неприваривающейся фольгой редко используют, в основном для изделий малоответственной службы. Вообще редко используемое соединение показано на рис. 5.2, *е*.

5.2. Расчет режимов шовной сварки

Для шовной сварки так же, как и для точечной, в результате многолетней производственной практики отработаны некоторые границы основных режимных показателей. Речь идет всегда о силе тока I, времени включения импульса $t_{ш}$, времени паузы между импульсами $t_{п}$, силе сжатия электродов P и линейной скорости наложения шва v. Принцип технологического подобия был показан ранее посредством критерия $K_{п}$ [см. формулу (2.87)]. Выбор сварочного (вторичного) тока также рекомендовался по формуле типа (2.88). В дальнейшем для точечной сварки эта формула получила численные коэффициенты: минимальный 120, максимальный 170 [см. формулу (4.15)]. Для шовной сварки время включения тока меньше, чем для точечной. По этой причине в формуле (4.15) для шовной сварки нужно применять максимальное значение коэффициента. Вместо диаметра принимается ширина рабочей части ролика b. Тогда в целом расчет тока можно производить по равенству

$$I = 170 b 10^3 \sqrt{\rho_т}, \qquad (5.1)$$

где b — в см; $\rho_т$ — в мкОм·см.

Скорость шовной сварки также отработана на практике для разных толщин и металлов. Для предельной толщины 3 + 3 мм линейная скорость сварки для всех металлов практически одина-

кова и близка к 0,7 см/с. Изменение скорости для других, меньших толщин и металлов разной электропроводности и теплоемкости представлено графиками, приведенными на рис. 5.3. Кривые не являются физическими абсолютами; относительно численных значений скоростей можно допускать изменения до ±20 %.

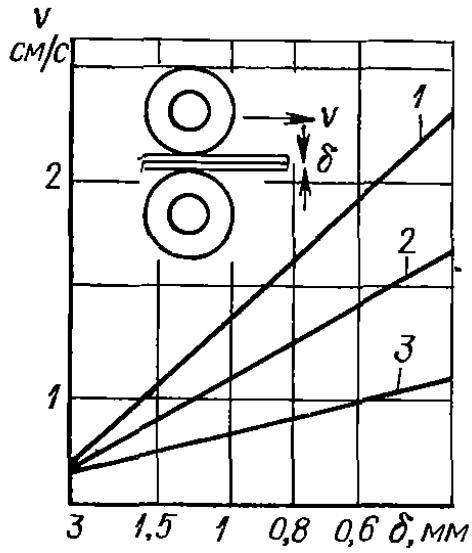


Рис. 5.3. Графики линейной скорости шовной сварки в зависимости от толщины металла для стали Ст3 (кривая *1*) коррозионно-стойкой и титана (*2*), алюминиевого сплава АМг и латуни Л62 (кривая *3*)

Поскольку для шовной сварки силу токов выбирают бóльшую, чем в среднем для точечной, длительность импульса времени его включения делают относительно более короткой, то критерий $K_ш$ [см. формулу (2.87)] получается численно больше критерия $K_ш$ [см. формулу (2.84)]. Практически он равен $K_ш = 90 \div 150$.

Учитывая эти данные, проделаем некоторые численные расчеты.

Пример 1. Свариваем детали из Ст3 толщиной 1 + 1 мм. Ширину роликов b можно выбирать такой же, что и диаметр ядра сварной точки. Тогда в данном случае $b = 5$ мм.

Сила сварочного тока $I_{св}$ по формуле (5.1)

$$I_{св} = 170 \cdot 0{,}5 \cdot 10^3/\sqrt{140} = 7 \text{ кА}.$$

Ток шунтирования по формуле (2.86), полагая перекрытие $k = 1/3$, получится таким:

$$I_ш = 7\,\frac{1}{2 - 1/3} = 4{,}2 \text{ кА}.$$

Вторичный, суммарный ток $I_ш = 11{,}2$ кА.

Силу сжатия роликов P (кН) для шовной сварки выбирают по наибольшему пределу δ (мм), принятому для сварки точечной:

Материал . .	Ст3 и низколегированные стали	Латунь	Алюминиевые сплавы	Коррозионно-стойкие стали и титан
$P \cdot 10$	0,3δ	0,35δ	0,5δ	0,5δ

Отклонения от этих рекомендаций могут быть ±10 %.

Для данного примера принимаем $P = 3$ кН. Предел текучести $\sigma_т = 250$ МПа. Опытные данные целого ряда заводов показывают, что критерий $K_ш$, рассчитанный по режимным показателям, получается в таких пределах:

Для стали Ст3	90—110
» » коррозионно-стойкой . . .	110—130
» титана	100—150
» алюминиевых сплавов	90—120
» латуни	90—120

Для данного примера примем $K_ш = 110$. Тогда по формуле (2.87)

$$K_ш = \frac{I^2 \rho_т h \sigma_т}{T_{пл} \sqrt{\lambda \gamma c}\, \delta P v \sqrt{t_ш + t_п}}.$$

Полагая $T_{пл}\sqrt{\lambda\gamma c} = 2130$ Дж/(см$^2 \cdot$ с$^{1/2}$), $h/\delta = 1$, $\rho_т = 140$ Ом$\cdot$см, находим:

$$110 = \frac{125 \cdot 10^6 \cdot 140 \cdot 10^{-8} \cdot 2500 \cdot 1}{2130 \cdot 300 v \sqrt{t_ш + t_п}}; \quad v\sqrt{t_ш + t_п} = 0{,}62.$$

По графику рис. 5.3 скорость сварки $v = 1{,}4$ см/с.
Временной цикл получается таким:

$$t_ш + t_п = 0{,}2 \text{ с}.$$

Пример 2. Свариваются детали из алюминиевого сплава АМг толщиной 0,5 + 0,5 мм. При этом $b = 3$ мм; $k = n/3$; $\rho_т = 10$ мкОм$\cdot$см, тогда

$$I_{св} = 170 \cdot 0{,}3 \cdot 10^3/3{,}16 = 16{,}21 \text{ кА}; \quad I_ш = 16{,}21 \frac{1}{2 - 1/3} = 9{,}684 \text{ кА};$$

$$I = 25{,}824 \text{ кА}.$$

При $K_ш = 120$

$$v\sqrt{t_ш + t_п} = \frac{667 \cdot 2500 \cdot 1 \cdot 10}{1530 \cdot 250 \cdot 120} = 0{,}363.$$

По графику рис. 5.3 $v = 1{,}1$. Соответственно

$$t_ш + t_п = 0{,}11 \text{ с}.$$

Пример 3. Свариваются детали из титана толщиной 1,3 + + 1,3 мм. Этот металл характеризуется тем, что оксидная пленка на нем как при точечной, так и при шовной сварке обязывает во избежание выплесков не выбирать слишком жесткие по силе тока режимы. При ориентации на средние режимы получим, если $b = 5$ мм, $k = n/3$:

$$I_{св} = 140 \cdot 0{,}5/\sqrt{165} = 6{,}56 \text{ кА}; \quad I_ш = 0{,}6 I_{св} = 3{,}94 \text{ кА};$$

$$I = 10{,}5 \text{ кА}; \quad K_ш = 130; \quad P = 6{,}5 \text{ кН}; \quad T_{пл}\sqrt{\lambda\gamma c} =$$

$$= 1340 \text{ Дж/(см}^2 \cdot \text{с}^{1/2}); \quad \sigma_т = 450 \text{ МПа}; \quad \rho_т = 120 \text{ мкОм}\cdot\text{см}.$$

При $v = 1$ см/с $t_ш + t_п = 0{,}52$ с.

Расчетным путем определять соотношение $t_ш/t_п$ довольно трудно. Эту задачу решают непосредственно в процессе практической корректировки режима сварки и размера перекрытия k. В большинстве случаев отношение $t_ш/t_п = 1 \div 2$, реже 2,5.

Глава 6

КОНТАКТНЫЕ МАШИНЫ И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

6.1. Общие сведения о машинах для контактной сварки

Контактная машина состоит из следующих основных частей:

1) силовой электрической части, служащей для выработки и подвода к свариваемым деталям сварочного тока;

2) привода сжатия соединяемых деталей и зажимных устройств, обеспечивающих приложение сварочных усилий; в основном используются пневматические, гидравлические, пневмогидравлические и электромеханические приводы и устройства, а также пружинные (на машинах малой мощности);

3) аппаратуры управления, задающей требуемую последовательность работы машины по технологическому циклу, а также обеспечивающей взаимодействие всех систем машины;

4) системы принудительного, как правило, водяного охлаждения активных частей машины.

Контактные машины общего назначения, согласно ГОСТ 297—80*Е, классифицируют:

1) по конструктивному оформлению сварного соединения: точечные, шовные, рельефные и стыковые;

2) по конструктивному исполнению самой машины. Так, например, точечные и шовные машины по характеру движения электрода делятся на машины прессового типа, если подвижной электрод перемещается по прямой линии, и радиального типа, если движется по дуге окружности. Машины могут быть стационарными и подвесными, причем последние бывают со встроенными или отдельными трансформаторами;

3) по типу источника сварочного тока: машины переменного тока, низкочастотные, постоянного тока и конденсаторные;

4) по характеру усилия сжатия: с постоянным и переменным усилием;

5) по нормируемым техническим требованиям контактные машины относят к одной из двух групп: группе А — при необходимости повышенной стабильности параметров и группе Б — при нормальной стабильности.

ГОСТ 297—80 регламентирует также обозначение контактных машин, которое позволяет извлечь полную информацию о типе и назначении машины. Обозначения могут состоять из одиннадцати символов (позиций). Первая позиция занята буквой М— машина, вторая — одной из четырех букв Т, Ш, Р или С, в зависимости от того, относится обозначение соответственно к точечной, шовной, рельефной или стыковой машине. В третьей позиции отображается тип источника сварочного тока: В — постоянного тока, К — конденсаторная, Н — низкочастотная. Отсутствие бу-

квы указывает на машину переменного тока. Конструктивное исполнение отмечается буквами: Р — радиальная, П — подвесная. Если рассматривается стыковая машина, то указывается, для какого конкретного способа стыковой сварки она предназначена: С — сопротивлением, О — оплавлением. В четвертой позиции для машин точечных, рельефных и шовных указывается наибольший вторичный ток (в кА). Для стыковых машин отмечается максимальное усилие осадки (в кН).

В последующих позициях (5—11) соответственно отмечают номер модификации завода-изготовителя, климатическое исполнение по ГОСТ 15150—69*, группу (А или Б), напряжение и частоту питающей сети, а также при необходимости — экспортный вариант исполнения либо технические условия на машину, либо ГОСТ 297—80* Е.

Ряд требований стандарт предъявляет к качеству питающего напряжения, сжатого воздуха и охлаждающей воды. Стандарт допускает отклонение сетевого питающего напряжения от —10 до +5 % номинального значения, а давление сжатого воздуха в сетях должно находиться в пределах от —15 до +5 % от номинального давления, за которое принято 0,63 МПа. Установлены также глубина фазового (плавного) регулирования сварочного тока для точечных, шовных и рельефных машин в пределах 100—50 % и пределы ступенчатого регулирования. В конденсаторных машинах регулирование сварочного тока легко осуществляется изменением напряжения заряда батареи конденсаторов, которое, в свою очередь, должно регулироваться в широких пределах — от 100 до 40 %.

ГОСТ 297—80 регламентирует также точность установки тока короткого замыкания, усилия на электродах, смещение электродов в горизонтальном и вертикальном направлениях и ряд других характеристик. Кроме того, он определяет правила приемки и методы испытаний контактных машин, а также транспортировки, хранения и упаковки.

Одним из основных силовых электрических элементов контактных машин является трансформатор. Условия работы таких трансформаторов существенно отличаются от используемых в других промышленных установках. Во вторичной обмотке трансформаторов контактных машин в повторно-кратковременном режиме протекают значительные токи, измеряемые обычно десятками и сотнями килоампер. В то же время полное сопротивление цепи нагрузки мало́ и составляет десятки и сотни микроом. Поэтому вторичное напряжение холостого хода обычно не превышает 12—16 В, что также согласуется с требованиями техники безопасности. В связи с этим вторичная обмотка трансформатора обычно имеет один виток, реже два.

Исходя из накопленного опыта проектирования и эксплуатации контактных машин ГОСТ 297—80 предъявляет ряд требований к их трансформаторам, основными из которых являются следующие.

1. Отношение максимального и минимального значений коэффициента трансформации должно быть не менее 2,0— для машин группы А; 1,4 и 1,8 — для машин группы Б при наличии и отсутствии фазового регулирования соответственно.

2. При наличии ступенчатого регулирования тока (секционированной первичной обмотки) переход на каждую последующую ступень регулирования не должен вызывать уменьшения коэффициента трансформации более чем на 20 или 30 %, в зависимости от группы машины А или Б соответственно.

3. Для всякой ступени регулирования напряжение между двумя любыми выводами первичной обмотки не должно быть более 1000 В. Кроме того, на максимальной ступени межвитковая изоляция первичной обмотки должна выдерживать напряжение, на 30 % превышающее номинальное питающее.

Основным узлом трансформатора является магнитная система. Находят применение как стержневые, так и броневые сердечники. Для контактной сварки труб используют трансформаторы с кольцевыми сердечниками.

Броневой сердечник применяется для уменьшения потоков рассеяния в магнитной системе трансформатора (уменьшения индуктивного сопротивления). Он позволяет более удобно и надежно закрепить обмотки. Последнее важно в связи с наличием значительных электродинамических сил, которые возникают при протекании сварочного тока и могут вызвать смещение обмоток по отношению друг к другу, а также относительно сердечника, что приводит к быстрому истиранию изоляции.

Магнитопроводы изготавливают из электротехнических марок сталей толщиной 0,5 мм. Используется два основных метода изготовления сердечников: шихтовка из отдельных пластин, поверхность которых предварительно покрывается изоляционным лаком; навивка из стальной ленты. Последний способ более производителен и технологичен. Поверхность ленты покрывают специальным составом, который после навивки сердечника и последующей термообработки (спекания) обеспечивает надежную изоляцию и механическую прочность. Затем сердечник разрезают на две симметричные половины, для возможности заведения обмоток. Торцы поверхности разрезания тщательно обрабатывают.

Значительное повышение ресурса работы трансформатора за счет исключения поступления атмосферной влаги к изоляции и взаимного смещения обмоток дает заливка пакета первичной и вторичной обмоток эпоксидным компаундом. При этом обмотки получаются в виде единого монолитного блока.

Для ступенчатого регулирования сварочного тока первичная обмотка секционирована, что, в свою очередь, позволяет ступенчато менять сварочный ток за счет изменения коэффициента трансформации.

Наиболее широко используют схему соединения секций первичных обмоток, предложенную заводом «Электрик» (рис. 6.1).

При использовании этой схемы удается удовлетворить основным требованиям ГОСТ 297—80. Напряжение на двух любых концах секций не превышает питающего.

Вся обмотка разбивается на несколько секций: обычно три, реже четыре. Каждая секция состоит из двух одинаковых дисковых катушек; таким образом, число дисков четно, что позволяет наиболее удобно расположить их в окне сердечника. Число витков при переходе от секции к секции наращивают обычно примерно в два раза.

Так как в пределах каждой секции катушки могут быть соединены и последовательно, и параллельно, а число витков в секциях различно, то число ступеней регулирования N определяется числом секций n : $N = 2^n$. Таким образом, при наличии трех секций можно задать восемь ступеней регулирования, а при четырех — шестнадцать.

Большинство современных машин для контактной сварки ориентировано на использование переменного сварочного тока нормальной частоты. Силовые сварочные трансформаторы связываются с питающей сетью посредством включающих и выключающих устройств самой разнообразной конструкции. Основой силовых коммутирующих устройств машин переменного тока, получивших название контакторов, являются два включенных встречно-параллельно управляемых вентиля (рис. 6.2, *а*), в качестве которых используют тиристоры или игнитроны. Вследствие значительно меньших падений напряжений, меньших габаритных размеров и большей надежности запуска применение тиристоров более предпочтительно.

Применение электронных коммутирующих устройств на первичной стороне позволяет также осуществлять в достаточно широких пределах плавное регулирование первичного, а следовательно, и сварочного тока. Униполярный импульс сварочного тока можно получить кратковременно, подключив первичную обмотку сварочного трансформатора к источнику постоянного напряжения. Такой принцип положен в основу получения импульсов тока в низкочастотных машинах (рис. 6.2, *б*). Этот тип оборудования в точечных и шовных вариантах был разработан и освоен промышленностью в конце 1950-х годов. В качестве управляемых вентилей силового выпрямителя *СВ*, являющегося источником постоянного напряжения, использовались в то время ртутные управляемые вентили — игнитроны. Аппаратура управления этих машин выполнялась на ламповo-релейных схемах. В связи с этими двумя обстоятельствами работа низкочастотных машин была недостаточно надежной. В 1970-х годах этот тип оборудования был вытеснен машинами постоянного тока и мощными конденсаторными. Внедрение в контактные машины силовых полупроводников управляемых вентилей — тиристоров, а также транзисторных и интегральных схем управления сделало целесообразным вновь перейти к выпуску низкочастотных точечных и шовных машин на новой элементной базе.

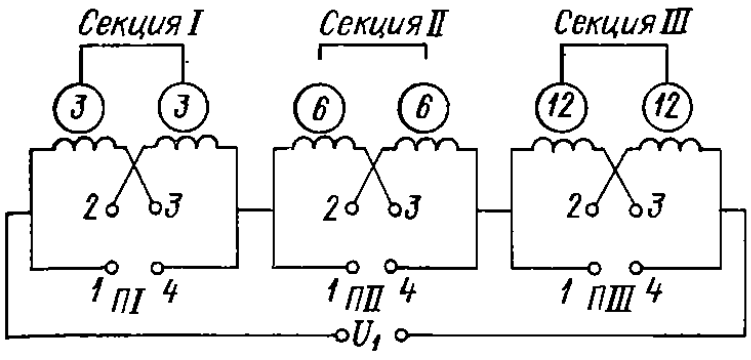


Таблица ступеней

№ ступени	Положение переключателей ПI	ПII	ПIII	W_1	U_{20}, В
1	⊂⊃	⊂⊃	⊂⊃	42	5,25
2	⊂⊃ ⊂⊃			39	5,65
3	⊂⊃	⊂⊃ ⊂⊃		36	6,10
4	⊂⊃ ⊂⊃			33	6,65
5	⊂⊃	⊂⊃	⊂⊃ ⊂⊃	30	7,35
6	⊂⊃ ⊂⊃			27	8,15
7	⊂⊃	⊂⊃ ⊂⊃		24	9,15
8	⊂⊃ ⊂⊃			21	10,50

Рис. 6.1. Типовые схемы переключений первичной цепи и таблица положений переключателя машин переменного тока завода «Электрик»

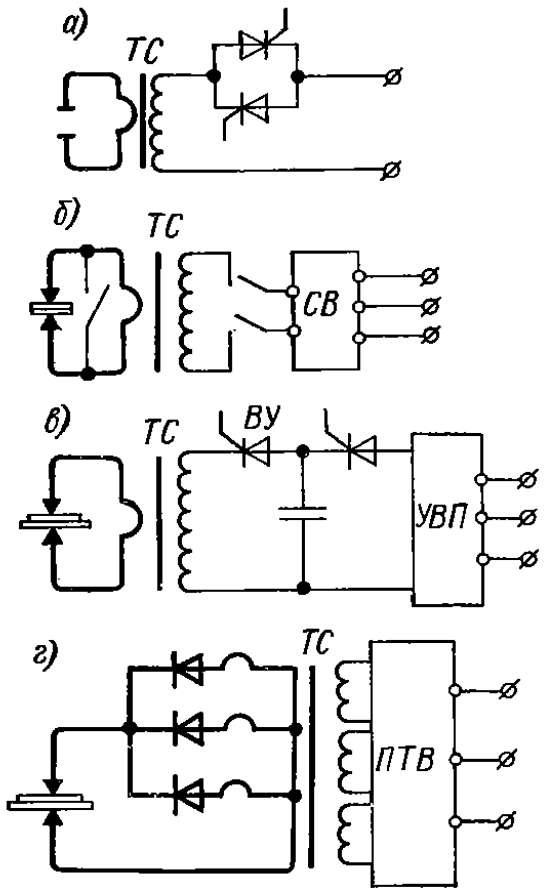


Рис. 6.2. Электрические схемы точечных машин

При работе точечных и рельефных машин время протекания сварочного тока составляет относительно небольшую долю общего времени сварочного цикла, остальное время идет на опускание электродов, сжатие деталей и т. п. При шовной сварке относительное время протекания тока больше, чем при точечной и рельефной, однако не превышает, как правило, 50 %. Поэтому для снижения установленной мощности сварочного оборудования в ряде случаев целесообразно во время отсутствия сварочного тока производить накапливание энергии сети в аккумулирующих устройствах. В качестве накопителей энергии предлагалось использовать конденсаторы, электрические аккумуляторы постоянного тока, вращающиеся массы с последующим преобразованием механической энергии в электрическую, электромагнитные накопители и некоторые другие.

Промышленное использование получила конденсаторная сварка. Наиболее широко применяется схема трансформаторно-конденсаторной сварки, предложенная в 1934 г. Г. И. Бабатом. Для соединения деталей малых сечений используется также и бестрансформаторная сварка.

Упрощенная принципиальная схема силовой части конденсаторной машины дана на рис. 6.2, *в*. Конденсаторная батарея, емкость которой C может регулироваться ступенчато, во время

отсутствия сварочного тока заряжается от трехфазного управляемого выпрямителя *УВП*. Напряжение заряда U_0 может плавно регулироваться в широких пределах. Таким образом, энергия, накопленная в батарее, $CU_0^2/2$, также регулируется в широких пределах. Для формирования импульса сварочного тока заряженная батарея отключается от выпрямителя и через управляемый вентиль *ВУ* разряжается на первичную обмотку трансформатора *ТС*, при этом во вторичном контуре формируется импульс сварочного тока.

В современной практике контактной точечной сварки весьма часто используется колебательный разряд конденсатора. Кривая разрядного сварочного тока в этом случае определяется известной формулой

$$i_2 = \frac{U_0}{\omega n L} e^{-b\tau} \sin \omega t, \qquad (6.1)$$

где U_0 — напряжение батареи конденсатора в начале разряда; ω — угловая частота,

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LCn^2} - \frac{r^2}{4L^2}},$$

C — емкость батареи конденсаторов, мкФ; n — коэффициент трансформации сварочного трансформатора (число первичных витков при одном вторичном).

Отношение $r/(2L)$ дальше обозначено через b (1/с), т. е. $b = r/(2L)$, где r — активное сопротивление сварочного контура машины и суммарное сопротивление всех контактов между электродами точечной машины, мкОм; L — коэффициент самоиндукции сварочного контура, мГ.

Согласно уравнению (6.1), эффективный ток сваривающей волны

$$I = \sqrt{\frac{1}{\tau}\int_0^{\tau} i_2^2 dt} = \frac{U_0}{nr}\sqrt{\frac{b\tau\left(1 - e^{-b\tau}\right)}{b^2\tau^2 + \pi^2}} = \frac{U_0}{nr}\varphi(b\tau). \qquad (6.2)$$

Функция $\varphi(b\tau)$ имеет следующие значения:

$b\tau$ . . .	0	1	2	3,5	5	10	15	23	30
$\varphi(b\tau)$	0	0,27	0,37	0,4	0,37	0,3	0,25	0,2	0,17

Для одной из конденсаторных машин на рис. 6.3 наглядно показаны формы кривых сварочного тока в зависимости от изменения основных параметров машины: числа витков в первичной цепи n, емкости батарей C и индуктивности сварочного контура L. Как видно, длительность включения тока, его амплитудное значение могут меняться в достаточно широких пределах для каждой машины. Весьма существенно и различие в скорости нарастания сварочного тока при каждом регулировании кривой тока.

В последнее время все большее распространение получают контактные машины постоянного тока, выпрямленного на вторич-

ной стороне (рис. 6.2, *г*). В них сварочный контур строится так же, как схема трехфазного однополупериодного выпрямления. Первичная, тоже трехфазная система *ПТВ*, обеспечивает подачу на трансформатор *ТС* импульсов переменного сетевого тока.

Представляет интерес сопоставление машин переменного и униполярного токов с технологической точки зрения, особенно применительно к сварке металлов с относительно высокими тепло- и электропроводностью, при равных возможностях сварки деталей по толщине. При протекании тока любого рода через свариваемые детали наибольшая плотность тока достигается в периферийных зонах контактов электрод—деталь и деталь—деталь. Значительная неравномерность плотности тока в контакте электрод—деталь интенсифицирует износ электродов при сварке на переменном токе, а в контакте деталь—деталь увеличивает вероятность конечного внутреннего выплеска. Последнее связано с интенсификацией тепловыделения в районе уплотняющего пояска.

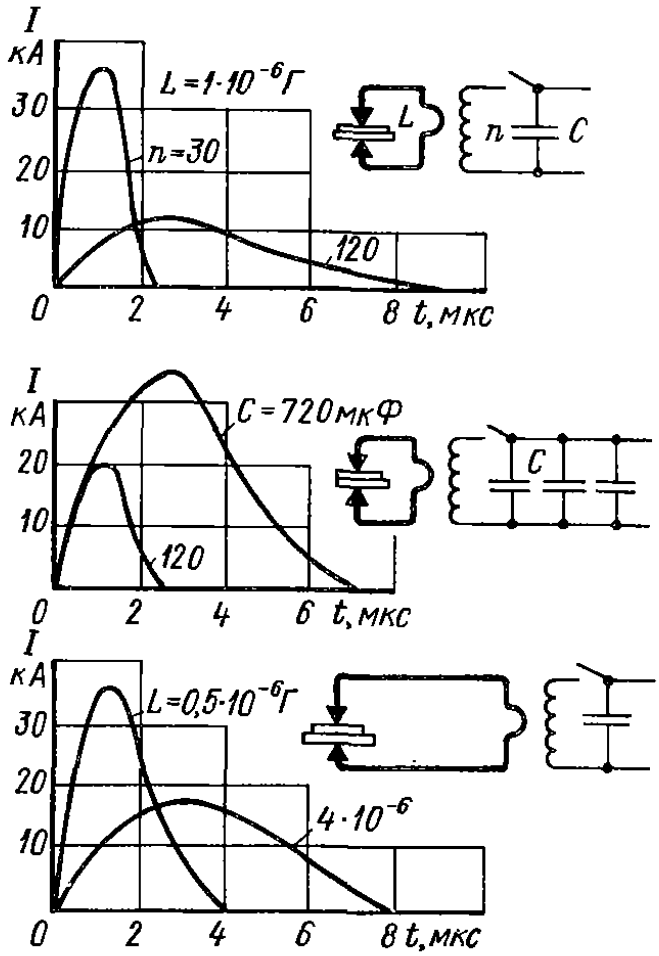


Рис. 6.3. Схема регулирования формы кривой сварочного тока в конденсаторных машинах

Экспериментальные данные П. Л. Чулошникова показали, что при точечной и шовной сварке алюминиевых, жаропрочных и высокопрочных сталей при вероятности выплеска 10 % на униполярном токе можно получить диаметр точки на 15—20 % выше, чем на переменном. По этой же причине при использовании машин униполярного тока можно в среднем на 10 % уменьшить величину нахлестки.

Тепловыделение в соединяемых деталях при сварке на переменном токе с использованием глубокого фазового регулирования принципиально носит пульсирующий характер. Во время значительных спадов тока и разрывов в его протекании тепловыделение падает или полностью прекращается — происходит остывание металла. Это явление слабо влияет на формирование точки при сварке металлов с относительно низкой теплопроводностью, особенно при сочетании деталей значительных толщин — в этом случае существенно сказывается тепловая инерционность. Металлы с низкой теплопроводностью (например, титан и его сплавы, кор-

розионно-стойкие и жаропрочные стали, углеродистые стали и т. п.) сваривают обычно на машинах переменного тока с любым регулированием кривой сварочного тока. Для металлов малых толщин (до 1 мм) и высокой теплопроводности тепловая инерция сказывается недостаточно, формирование точки может носить пульсирующий характер. Для получения заданного размера диаметра литого ядра при сварке на переменном токе, по сравнению с униполярным, приходится увеличивать амплитуду тока, из-за чего возрастают вероятность выплеска и износ электродов.

При стыковой контактной сварке вследствие меньших удельных плотностей внутренних источников теплоты и большего времени нагрева осредняющее действие тепловой инерции сказывается в большей степени. Процессы стыковой сварки обычно ведут поэтому на переменном токе. Однако следует учитывать, что для устойчивости процесса оплавления униполярные токи предпочтительнее.

6.2. Технологические характеристики контактных машин

Проектирование технологии контактной сварки начинается с расчета режима сварки единичного соединения. После этого рассчитываются все возможные электрические процессы в сварочном контуре, связанные с размерами деталей, свойствами металла, числом сварных соединений.

Эффекты шунтирования тока, индуктивность деталей внесут коррективы в расчетные значения вторичных токов. Если рассмотреть наиболее сложный случай точечной сварки крупногабаритных конструкций, то полное электрическое сопротивление сварочного контура Z_2 сложится из следующих составляющих:

$$Z_2 = \sqrt{(R_{ээ} + r_к)^2 + (x_к + x_{мп} + x_{мк})^2}, \qquad (6.3)$$

где $R_{ээ}$ — сопротивление металла и контактов между губками машины при стыковой сварке и между электродами при точечной и шовной сварке.

Для точечной сварки в общем случае

$$R_{ээ} = r_т + 2R_п, \qquad (6.4)$$

где $r_т$ — электрическое сопротивление горячей точки; $2R_п$ — переходные сопротивления контакта от электрода к деталям.

Для стыковой сварки методом сопротивления

$$R_{ээ} = R_{к.\,ср} + 2R_м + 2R_п, \qquad (6.5)$$

где $R_{к.\,ср}$ — среднее значение сопротивления контакта; $2R_м$ — сопротивление концов свариваемых деталей; $2R_п$ — переходное сопротивление между зажимными губками и свариваемыми деталями.

И расчеты, и измерения показывают, что если величину $2R_м$ учитывать как сопротивление деталей при средней температуре,

равной половине температуры точки плавления, то составляющую $R_{к.ср}$ можно не учитывать совсем. Для стыковой сварки оплавлением, наоборот, в сумме $R_{ээ}$ составляющая $R_{оп}$ играет главную роль.

Формула (6.3) в полном ее начертании относится к сварке стальных магнитных деталей на машинах переменного тока. Если же речь идет об использовании выпрямленного тока, то все индуктивные составляющие выпадают. Полное сопротивление сварочного контура определяется тогда только суммой активных сопротивлений $r_к$ — самого вторичного витка и нагрузочного сопротивления $R_{ээ}$. Сварщику-технологу оперировать всеми этими сопротивлениями приходится в двух особых случаях практики.

1. При выборе готовой, существующей машины, способной обеспечить проектируемую технологию, или при составлении технического задания на проектирование новой машины.

2. При определении способности машины вести сварочный процесс для каких-то новых, еще только проектируемых конструкций, если известны электрические параметры этой машины.

Правильный выбор готовой или заказ новой машины осуществляется в том случае, если машина без систематической перегрузки, но и без большого запаса неиспользуемой электрической и механической энергии сможет обеспечивать заданный технологический цикл. Это значит практически, что всякая контактная машина по ее электрическим и механическим параметрам должна работать, как правило, на режимах на 20—25 % ниже ее предельных. Такого рода рекомендации полезны не только для длительной сохранности машины, но и работоспособности ее в гибких автоматизированных производствах (ГАП).

Изложенные выше соображения говорят о том, что электрические и механические расчеты, к которым должен иногда прибегать технолог, могут вестись с меньшими точностями, чем те, которыми занимаются профессионалы-проектировщики контактных машин. К сожалению, и приближенные расчеты, например, электрических параметров машин для технологов оказываются не слишком легкими. Наиболее просто определяются электротепловые способности машин. Завод-изготовитель в паспортных данных показывает значение вторичных токов длительного или прерывистого режима либо и те, и другие числа.

В условиях эксплуатации далеко не всегда машина обязана работать по стандартно заданному циклу. По этой причине технологу всегда необходимо произвести пересчет токов для принятого значения ПВ в данном производстве. Здесь следует вспомнить закон прерывистой работы любой электротехнической системы

$$I_{дл} = I_{пв}\sqrt{ПВ}, \tag{6.6}$$

где

$$ПВ = t_с/(t_с + t_п); \tag{6.7}$$

$I_{дл}$ — безопасный для машины ток длительного включения; $I_{пв}$ — сварочный ток, используемый в данном сварочном цикле; $t_с$ — время включения сварочного тока; $t_п$ — время паузы между циклами включения.

Ток прерывистого включения $I_{п.в}$ может быть таким, чтобы нагрев всех активных частей машины не превышал тех допущенных для данной машины норм, какие конструкторы машины определили в качестве предельных для длительного включения.

Электрические характеристики сварочного контура ($Z_к$ — полное его сопротивление; $x_к$, $r_к$ — индуктивное и активное сопротивления, измеряемые обычно в микроомах) сварщик-технолог должен уметь оценить во всех случаях, хотя бы и приближенно.

Заводы-изготовители сообщают потребителям вторичные напряжения холостого хода машин по ступеням регулирования. Эти данные можно считать абсолютными и не зависящими от конструкции вторичного контура. Другое дело — внешние характеристики машин, которые заводы-изготовители также сообщают потребителю, но только для определенной заводом избранной конструкции сварочного контура и его размеров. Внешние характеристики завода дают возможность определить значение $Z_к$, которое вычисляется делением напряжения холостого хода на силу тока короткого замыкания. На внешних характеристиках контактных точечных и шовных машин следут остановиться подробнее.

В современных условиях производства для подавляющего большинства свариваемых изделий и конструкций оказываются вполне достаточными сравнительно небольшие размеры сварочных контуров. Для большинства точечных и шовных машин расстояние от точечных или роликовых контактов до корпуса (вылет электродов) не превышает 60 см. Раствор токоведущих шин составляет около 40 см. Но уже и для таких размеров площади, охватываемой контуром сварочного тока, полное сопротивление контура имеет значительную величину — 400—500 мкОм в зависимости от конструкции токоведущих шин.

Если не учитывать разнообразие этих конструкций, то по опытным данным многих старых и новых машин можно построить кривую $Z_к = f(S)$. Площадь контура S определяют как произведение вылета электродов a на раствор токоведущих шин b. На рис. 6.4 построена кривая $Z_к = f(ab)$ в виде области, в пределах которой вписываются значения сопротивлений очень многих точечных и шовных машин. По этой зависимости технолог может приближенно оценить то значение $Z_к$, которое у него получается при проектировании сварочного цикла для известной ему по габаритным размерам свариваемой конструкции. К сожалению, для определения полного сопротивления сварочного контура с учетом индуктивности свариваемых деталей график, приведенный на рис. 6.4, прямо не дает значения $x_к$: эту величину следует приближенно принимать по нижней границе штрихованной области.

Зависимость $Z_к = f(S)$ показывает, насколько переменный ток даже нормальной частоты создает низкий электрический КПД в сварочном контуре. С этим обстоятельством придется мириться еще длительное время: до тех пор, пока машины постоянного тока с выпрямлением в сварочном контуре не вытеснят машины переменного тока. В том, что такое вытеснение произойдет в заметных масштабах, сомневаться не следует, если учесть основную особенность машин постоянного тока — почти нулевое индуктивное сопротивление сварочного контура.

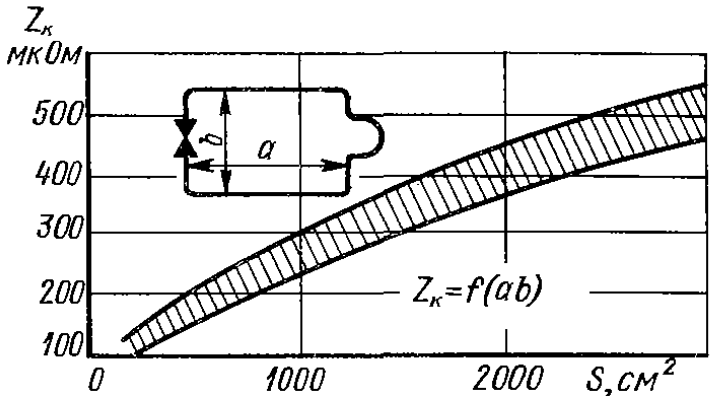


Рис. 6.4. Полное сопротивление сварочного контура точечных и шовных машин переменного тока в зависимости от площади контура

Машины постоянного тока (дорогие и сложные в изготовлении) имеют огромное преимущество, так как позволяют осуществлять вылеты электродов и роликов на большое расстояние. Машины такого рода, как, например, МШВ-6301 (МТВ-6301), имеют вылет 134 см и минимальный раствор контура 30 см. При такой площади ее $Z_к$ на переменном токе создавал бы величину не менее 600 мкОм. При напряжении холостого хода 4,5 В ток короткого замыкания не превышал бы 7,5 кА. В действительности, в машине типа МТВ-6301 через свариваемый контакт проходит выпрямленный вторичный ток. Активное сопротивление короткого замыкания вторичного витка приблизительно 55 мкОм. Следовательно, не только токи короткого замыкания, но и рабочие сварочные получаются более 70 кА, поскольку сварочная нагрузка тоже состоит из активных сопротивлений:

$$R_{ээ} = r_т + 2R_п + R_{вх}, \qquad (6.8)$$

где $r_т$ — сопротивление горячей точки в момент выключения тока; $2R_п$ — два переходных сопротивления от электродов к изделию; $R_{вх}$ — электрическое сопротивление, которое может создаваться за счет энергии вихревых токов, возникающих в свариваемых деталях при импульсных включениях униполярного тока. Для иллюстрации этого эффекта можно произвести конкретный расчет. Рассматривая свариваемую деталь как тороид, который пронизывается импульсом тока, для обеих сторон этой детали потери на вихревые токи определяются по формуле

$$P_{вх} = \frac{4}{10^4}\sqrt{\rho f B H^3}. \qquad (6.9)$$

Здесь $P_{вх}$ — потери энергии (в Вт) на вихревые токи, отнесенные к 1 см² поверхности; ρ — удельное сопротивление металла; f — частота тока; B — магнитная индукция в металле; H — напряженность поля, созданного сварочным током.

Имея в виду в первую очередь сварку, например, алюминиевых сплавов, для которых пока и используются машины постоянного тока, имеем равенство $B = H$. Следовательно, из формулы (6.9) находим

$$P_{вх} = \frac{4H^2}{10^4}\sqrt{\rho f}\,.$$

Положим в среднем

$$H = I/(\pi d_т 2),$$

тогда

$$P_{вх} = I^2\sqrt{\rho f}/(10^4\pi^2 d_т^2).$$

Следует иметь в виду, что на расстоянии $D \approx 10d_т$ магнитное поле практически гаснет до нулевого значения. Тогда независимо от действительного габаритного размера свариваемого узла, может быть и очень большого, площадь, на которой действуют вихревые токи, можно оценивать так: $10^2\pi d_т^2/4$. Отсюда

$$P_{вх} = I^2\sqrt{\rho f}\,\pi 100/(10^4\pi 4)$$

и, соответственно, эквивалент сопротивления вихревым токам

$$R_{вх} = 25\sqrt{\rho f}/10^4. \qquad (6.10)$$

Приведем численный пример. Допустим, идет сварка алюминиевых сплавов на конденсаторной машине или на машине постоянного тока. Удельное сопротивление холодного металла: $\rho = 3{,}5\cdot 10^{-6}$ Ом·см. При времени действия сварочного импульса $t = 0{,}04$ с $f = 25$ Гц, тогда по формуле (6.10)

$$R_{вх} = 25\sqrt{3{,}5\cdot 25}/(10^4\cdot 10^3) = 23 \text{ мкОм}.$$

При более коротком импульсе, например при $t = 0{,}004$ с, значение вихревого сопротивления возрастает до 73 мкОм.

Как видно, с вихревыми сопротивлениями надо считаться при импульсных режимах, даже имея дело с металлами высокой электропроводности. Этот пример снова показывает обязательную необходимость при всех расчетах и режимах сварки, а также параметрах оборудования не пренебрегать бездоказательно никакими электромагнитными эффектами, когда дело идет об импульсах тока большой величины, действующих в металле. Выше неоднократно обращалось внимание на принцип всеобщей связи явлений. Обращалось внимание (с учетом этого принципа) на необходимость подвергать сомнениям целый ряд электрических и физических констант, которые добывались когда-то посредством «печных» экспериментов и посредством измерений при малых силах тока. К сожалению, систематизированных измерений, например, удельных сопротивлений металла под действием большой силы магнитных полей в литературных источниках нет.

После того как технолог расчетным или экспериментальным путем либо сопоставлением этих методов определил основные технологические режимные показатели для своей конструкции, он должен выбрать готовую машину или заказать специализированную. Как было видно из изложенных выше расчетных методов, технолог располагает следующими данными:

1) пределами напряжений холостого хода машины;
2) силой сварочных или вообще вторичных токов;
3) пределами сил сжатия.

Если речь идет о точечной сварке изделий и конструкций из обычных конструкционных сталей, то в большинстве случаев технолог может ориентироваться на выбор нормальных точечных машин переменного тока, основные технологические характеристики которых приведены ниже:

Марка машины	МТ 1423	МТ 1818	МТ 2102	МТ 2827	МТ 4019	МТ 4218
Длительный вторичный ток, кА	5,5	9	9	14	10	18
Номинальная сила сжатия электродов, даН	1568	617	1960	1225	1568	2450
Вылет электродов, мм	500	500	1200	500	500	500

Универсальные шовные машины имеют следующие характеристики:

Марка машины	МШ-2001-1	МШ-3201
Длительный вторичный ток, кА	14	22
Номинальная сила сжатия, даН	784	1225
Номинальный вылет роликов, мм	800	800
Скорость сварки, м/мин	0,4—4,8	0,4—6,8

Универсальные рельефные машины переменного тока имеют следующие характеристики:

Марка машины	МР-3818	МР-6918	МР-6303
Длительный вторичный ток, кА	11,2	18	28
Номинальная сила сжатия, даН	1568	2450	3136
Номинальный вылет до центра плиты, мм	300	300	300

Приведенные здесь характеристики универсальных машин переменного тока недостаточны для современной технологии контактной сварки изделий и конструкций из легированных сталей, алюминиевых сплавов и титана. Для этих металлов очень заметное развитие теперь получают машины конденсаторные и постоянного тока с выпрямлением во вторичном контуре. Для машин этого типа характерны не внешние характеристики, как это привычно для машин переменного тока, а нагрузочные характеристики. Сварочные токи в выпрямленных контурах определяются электрическим активным сопротивлением, которое вводится в контур сварочной машины.

Управление электрической и механической энергией машин постоянного тока стало очень сложным и, самое главное, таким,

какое позволяет применять широкие диапазоны изменения программ действующих токов и прикладываемых давлений.

Основные технологические свойства машин конденсаторных и постоянного тока следует рассмотреть несколько подробнее.

Машины конденсаторные. Для марки машины МТК-5001 напряжение заряда 150—380 В. Емкость батареи 35—105 мФ. Вторичное напряжение при коэффициенте трансформации $n =$ $= 148$ $U_{20} = 5{,}13$ В; при $n = 74$ $U_{20} = 10{,}26$ В. Длительный вторичный ток 8 кА. Машина обеспечивает постоянное давление, проковочное и седлообразное (с предварительным обжатием). Приблизительный диапазон свариваемых толщин: для легких сплавов и титана от 0,3+0,3 мм до 1,5+1,5 мм для коррозионно-стойкой стали до 1,2+1,2 мм.

Машина марки МТК-8004 обладает следующими характеристиками. Пределы регулирования напряжения на батарее конденсаторов 150—380 В. Наибольшая емкость батареи конденсаторов 315 мФ. Длительный вторичный ток 14 кА. Диапазон свариваемых толщин — до 2,5 + 2,5 мм. Формы кривых сварочного тока $I_{св}$ показаны на рис. 6.5. Цифры на кривых относятся к емкостям: *1* — 35 мФ; *2* — 70 мФ; *3* — 122,5 мФ; *4* — 157 мФ; *5* — 245 мФ; *6* — 315 мФ. На рис. 6.5, *а* $n = 42$, на рис. 6.5, *б* $n = 84$. Зарядное напряжение в обоих случаях 380 В.

Машины постоянного тока. В качестве одной из типовых машин средней мощности можно рассмотреть машину марки МТВР-4001. Характеристики ее внешнего контура: при растворе 140 мм и вылете электродов 850 мм активное сопротивление короткого замыкания сварочного контура 90 мкОм; при растворе 390 мм и вылете 1200 мм — 97 мкОм. Уже из этих данных видно, насколько несущественно по сравнению с машинами переменного тока, сказываются размеры сварочного контура на одной из самых главных характеристик.

Машина имеет 16 ступеней регулирования и вторичное напряжение холостого хода 1,88—5,4 В. Длительный вторичный ток машины 14 кА. Диапазон свариваемых толщин для алюминиевых сплавов до 2 мм, для коррозионно-стойких сталей и титана до 2,5 мм.

Нагрузочные характеристики на максимальной ступени показаны на рис. 6.6. Минимальная характеристика параллельна ей и начинается от 20 кА, падая до 7 кА. Для разных по размеру контуров характеристики почти не различаются.

Своеобразны характеристики машин типа МТВУ-4003. Она может обеспечивать сдвоенные импульсы тока разной амплитуды, как это было показано на рис. 4.6. Свариваемые толщины на этой машине: для алюминиевых сплавов до 1,5 мм, для жаропрочных и титановых сплавов до 3 мм, для конструкционных сталей до 5 мм.

Приведенные выше справочные данные по характеристикам контактных точечных машин показывают, что правильно выбрать,

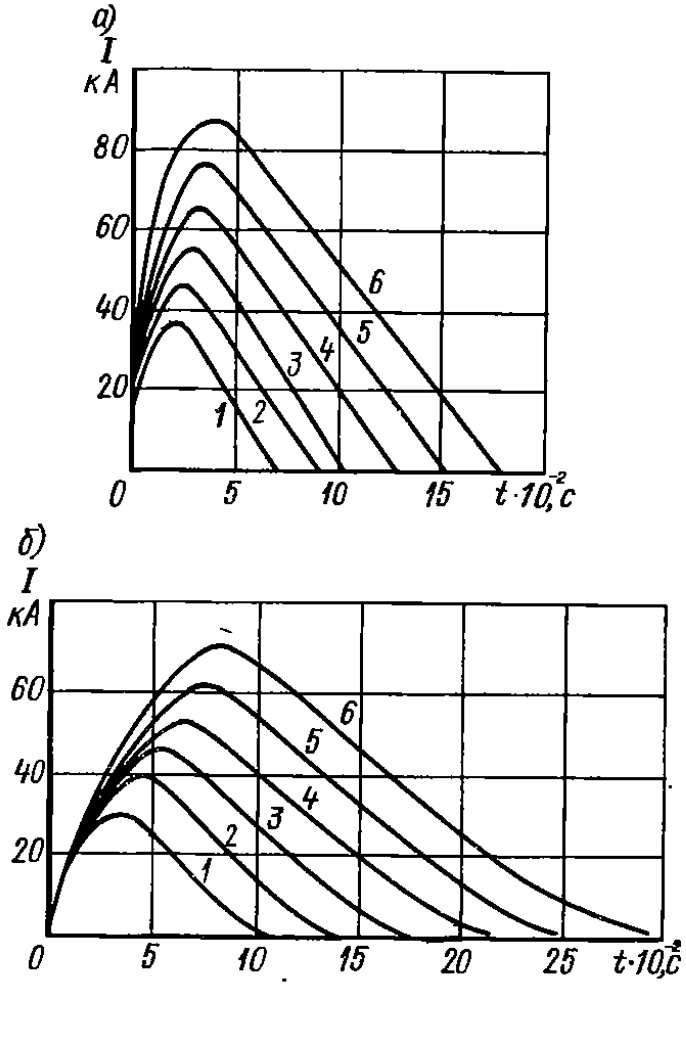
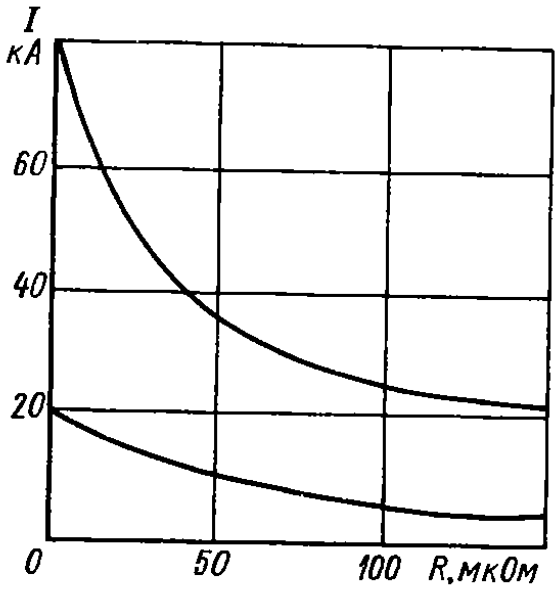


Рис. 6.5. Разрядные сварочные токи точечной конденсаторной машины МТК-8004

Рис. 6.6. Нагрузочные характеристики точечной машины постоянного тока МТВР-4001



например, точечную машину достаточно просто только для сварки обычных конструкционных сталей. Здесь применяется переменный ток, в лучшем случае с модуляцией его амплитуды. Если же речь идет (сейчас, а тем более в ближайшем будущем) о сварке изделий ответственной службы из сложных сплавов и сталей, то ответственный выбор готовых машин технолог должен согласовывать с заводами-изготовителями. Интересно отметить при этом, что согласование касается обычно граничных параметров. Но если технолог обоснованно задумал, а часто и проверил какой-то новый цикл и по форме сварочных токов, и по программе изменения прикладываемых давлений, то в этих случаях он предъявляет требования к будущим сварочным качествам машины. Стоит отметить при этом, что современные проектировщики оборудования вполне способны решить любые поставленные перед ними задачи по созданию любых новых машин, с какими угодно электрическими и механическими свойствами.

6.3. Проектирование технологии контактной сварки и выбор контактных машин

Электрическая контактная сварка — это технология принципиально массового производства: или отдельных сварных соединений на множестве мелких деталей, или множества сварных соединений на потоке отдельных крупногабаритных конструкций.

Наибольший интерес для машиностроения представляет поточность крупногабаритных конструкций. Для того чтобы рассмотреть основные принципы проектирования технологии контактной сварки, следует использовать какой-либо типовой характерный пример, на котором можно было бы показать как правильные, так и ошибочные проектные решения.

Поскольку главным элементом технологии является машина, то именно в вопросах выбора и назначения машин и могут быть основные ошибки проектирования. Для примера рассмотрим некоторую условную сварную конструкцию, для которой можно было бы использовать несколько способов контактной сварки. Конструкция такого рода детали представлена на рис. 6.7, *а*. Конкретизируем проектную задачу: сваривается Ст3 толщиной 1,5 мм. Производительность поточной линии не менее 30 панелей в час. При длине линии 1,4 м скорость движения панелей должна быть не менее 42 м/ч, т. е. 1,16 см/с.

Рассмотрим вариант, когда все линии сварных соединений могут быть неплотными, т. е. вполне можно обойтись только точечной сваркой. Самым примитивным и самым ошибочным решением, которое, к сожалению, иногда имеет место и в настоящее время, является ориентация на использование нормальных машин общего назначения (рис. 6.7, *б*). При постоянном сварочном контуре машина такого рода все время будет работать с переменной индуктивностью, вносимой свариваемыми деталями, и с переменным шунтированием, а, следовательно, при полной нестабильности режима сварки и размера сварных точек. Мало того, синхронизировать перемещение в двух измерениях самой машины относительно движущегося потока деталей будет непросто. Поточные линии требуют, как правило, создания специализированных машин. Одна из схем такого рода показана рис. 6.7, *в*. Здесь два трансформатора, включенных параллельно, посредством поочередного включения парных встречных электродов ставят точки в процессе медленного перемещения потока и возвращаются с большой скоростью для сварки новой панели. Особенность параллельного включения определяется суммированием токов обоих трансформаторов и значительным выравниванием общей силы тока для средних точек. Однако наилучшим решением будет создание специализированных многоэлектродных и многотрансформаторных машин (рис. 6.8). Особенно интересен последний вариант, когда машина может быть создана трехфазной с первичной стороны и с тремя открытыми фазами во вторичном контуре. Такая схема от двух встречно расположенных трансформаторов будет обеспечивать за один цикл по шесть точек. Многоточечную производительность за один цикл могут дать и рельефные машины. Однако, как и при одноточечной машине (см. рис. 6.7, *б*), в контур рельефной машины будут включаться переменные индуктивности свариваемых деталей. Небольшой выигрыш определится при использовании двух параллельно включенных рельефных машин.

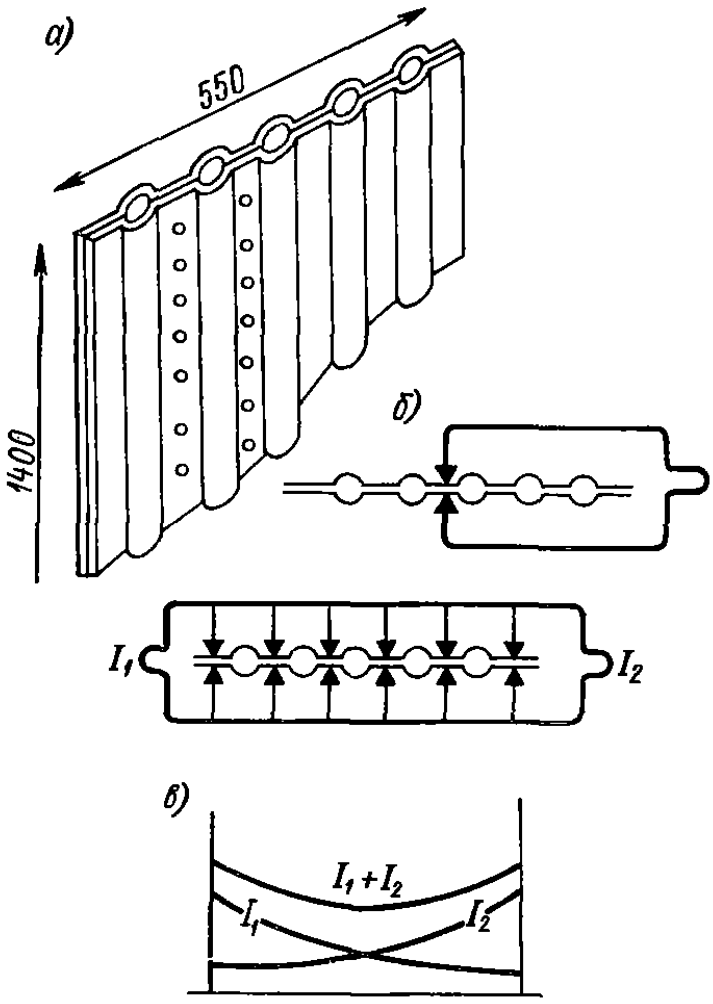


Рис. 6.7. Примеры выбора типа точечных машин для сварки панелей

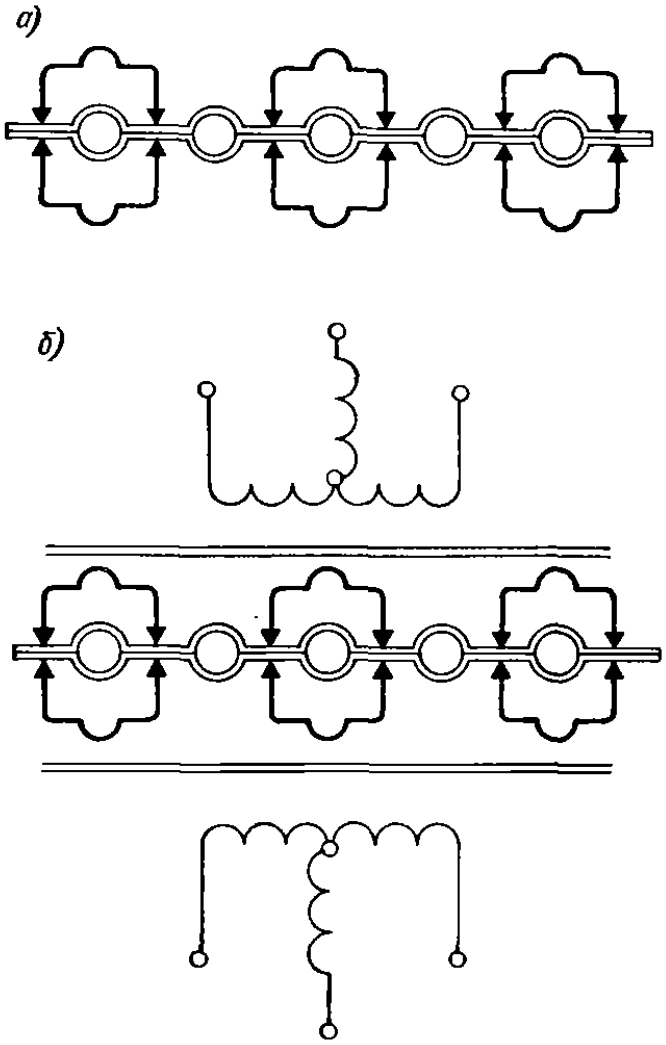


Рис. 6.8. Схемы многоэлектродных точечных машин: *а* — однофазные; *б* — трехфазные

Рассмотрим теперь варианты использования шовных машин. Относительно применения нормальных шовных машин можно повторить то же самое, что было показано для нормальных точечных. Особенно нерентабельным представляется всегда факт использования шовных (да и точечных) машин с нормальным большим вылетом для создания швов на кромках свариваемых деталей. Кромочные швы применяются довольно часто, а для них, к сожалению, нормальных серийных машин с коротким вылетом электродов не производят. Для примера можно сослаться на несколько необычных вариантов конструкций кромочных машин. Один из них показан на рис. 6.9. Здесь вращающийся трансформатор *1* с рабочим роликом *5* и холостым *6* составляют минимально короткий сварочный контур. Замыкающими служат: рабочая подкладочная шина *4* и холостая, хотя и токоведущая *2*, опирающаяся на пружинную (упругую) подкладку *3*. Трансформатор такого рода при вторичном напряжении порядка 1,6 В может обеспечить мощность до 50 кВА при ПВ = 60 %. Полное сопротивление вторичного контура составляет около 50 мкОм, ток короткого замыкания — 32 кА. Габаритные размеры траисформатора вместе

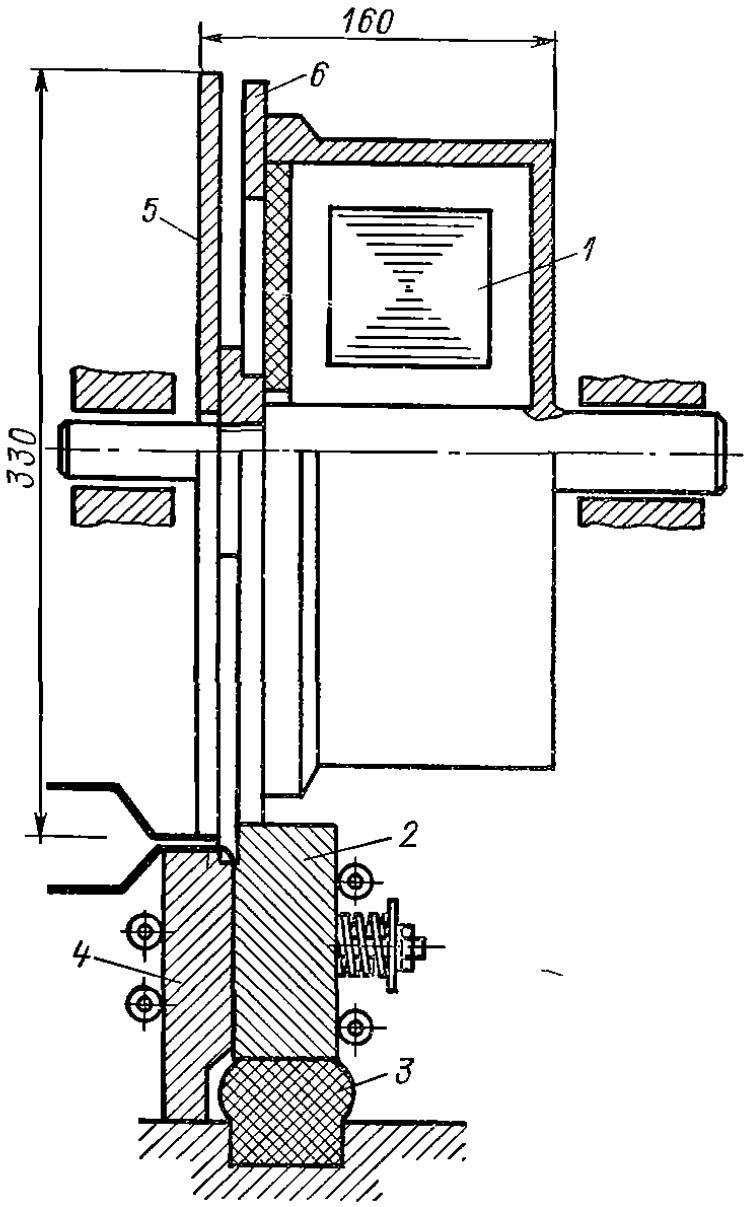


Рис. 6.9. Схема специализированной шовной машины для кромочных швов

с роликами даны на рис. 6.9. Представляют интерес еще две схемы шовно-кромочных машин, показанные на рис. 6.10. Схема *А* строится из трансформатора с вращающимся вторичным витком *1* и синхронно с ним передвигающимся замыкающим витком *2*. Схема *Б* состоит из группы неподвижных трансформаторов, подключенных к токоведущей шине *1*. Замыкающий виток *2* является подвижным элементом машины. Обе схемы могут быть созданы с питанием токоведущих шин от одного трансформатора относительно большой мощности вместо нескольких неподвижных, параллельно включенных.

На рис. 6.11 показана схема строения токоведущих нижних шин как контура одинаковой индуктивности. Вторичный виток трансформатора *1* присоединяется к шинам *2*, построенным так, что площадь, охватываемая контуром трансформатора, при движущихся роликах *3* остается приблизительно постоянной. Постоянство площади контура сохраняет постоян-

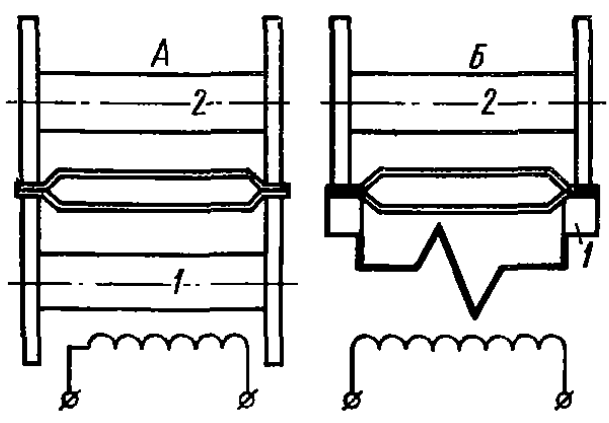


Рис. 6.10. Схемы коротковитковых шовных машин для сварки кромочных швов

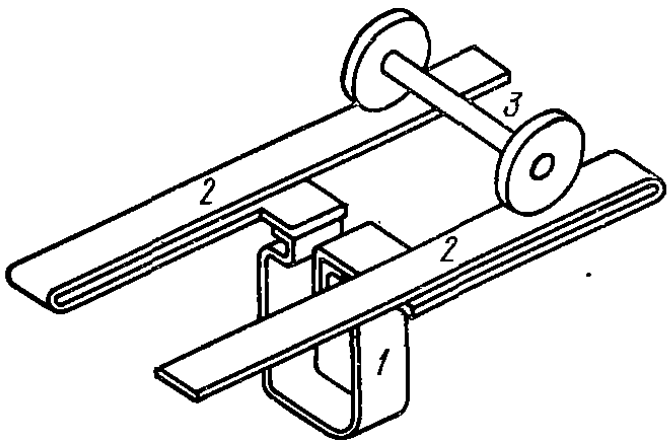


Рис. 6.11. Сварочный контур приблизительно постоянной индуктивности

ство его индуктивности, и, следовательно, стабильность режима сварки.

Здесь приведено только несколько характерных вариантов специализированных контактных машин. В действительности для отраслей особо ответственного машиностроения и строительства на сегодня создано и создается очень много весьма разнообразных контактных машин. И это несмотря на то, что ассортимент нормальных машин, изготовляемых заводом «Электрик», стал весьма богатым по технологическим возможностям.

6.4. Поточные линии контактной сварки

В качестве одного из характерных примеров поточно-массового производства контактной сварки можно рассмотреть автоматическую поточную линию изготовления плоских стальных отопительных радиаторов, которая действует в течение уже многих лет.

Эта линия обладает гибкостью, позволяющей быстро перестраивать ее с одного типоразмера радиатора на другой. Конструкция одного из типоразмеров радиатора показана на рис. 6.12. Все радиаторы изготавливаются из рулонов холоднокатаной стали марки 08кп или 10кп толщиной 1,5 мм, шириной 625 мм. Процесс изготовления начинается с одновременной размотки двух рулонов (позиция *А*, рис. 6.13) и штамповки на каждом из них каналов для движения по ним горячей воды. В позиции *Б* обе штампованные, но не разрезанные половины совмещаются по длине и по кромкам и на выдавленные входные и выходные окна надеваются штуцера. В позиции *В* начинается контактная точечная сварка обеих половин. Точки друг от друга ставятся на расстоянии 30—50 мм (регулируется для разных типоразмеров) между всеми каналами (см. рис. 6.12). Здесь работает специализированная многоэлектродная точечная машина типа МТМ-11. Машина двустороннего дей-

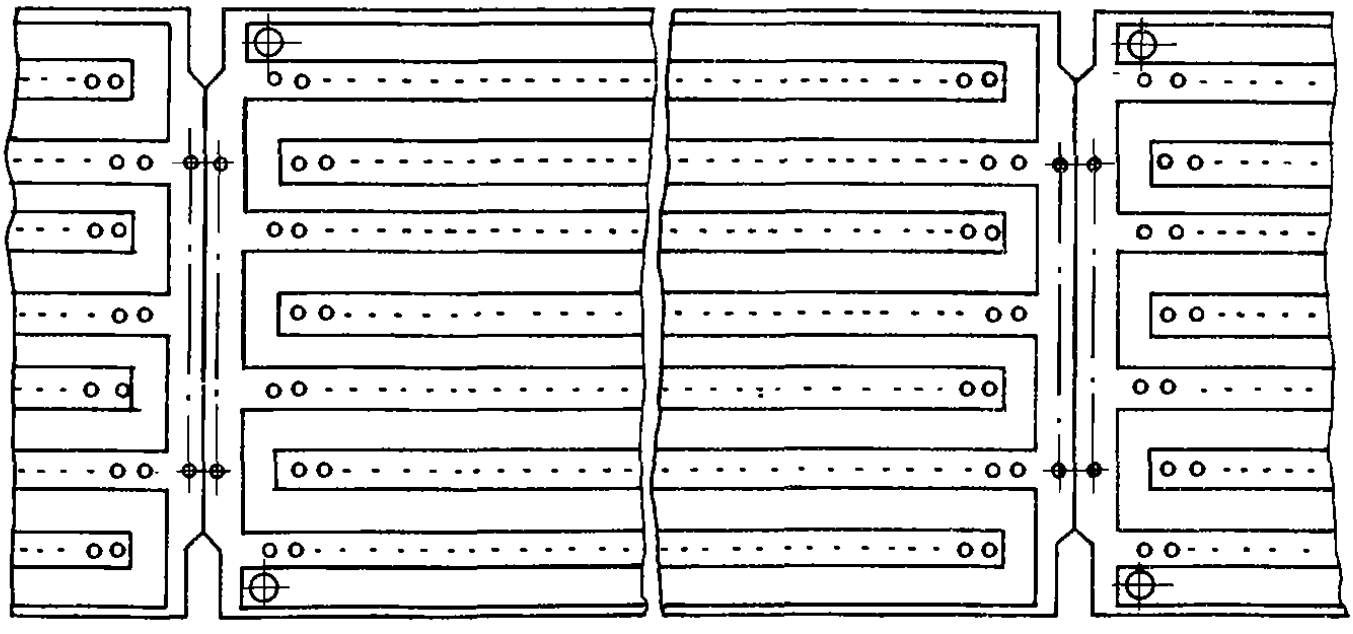


Рис. 6.12. Общий вид плоского стального отопительного радиатора

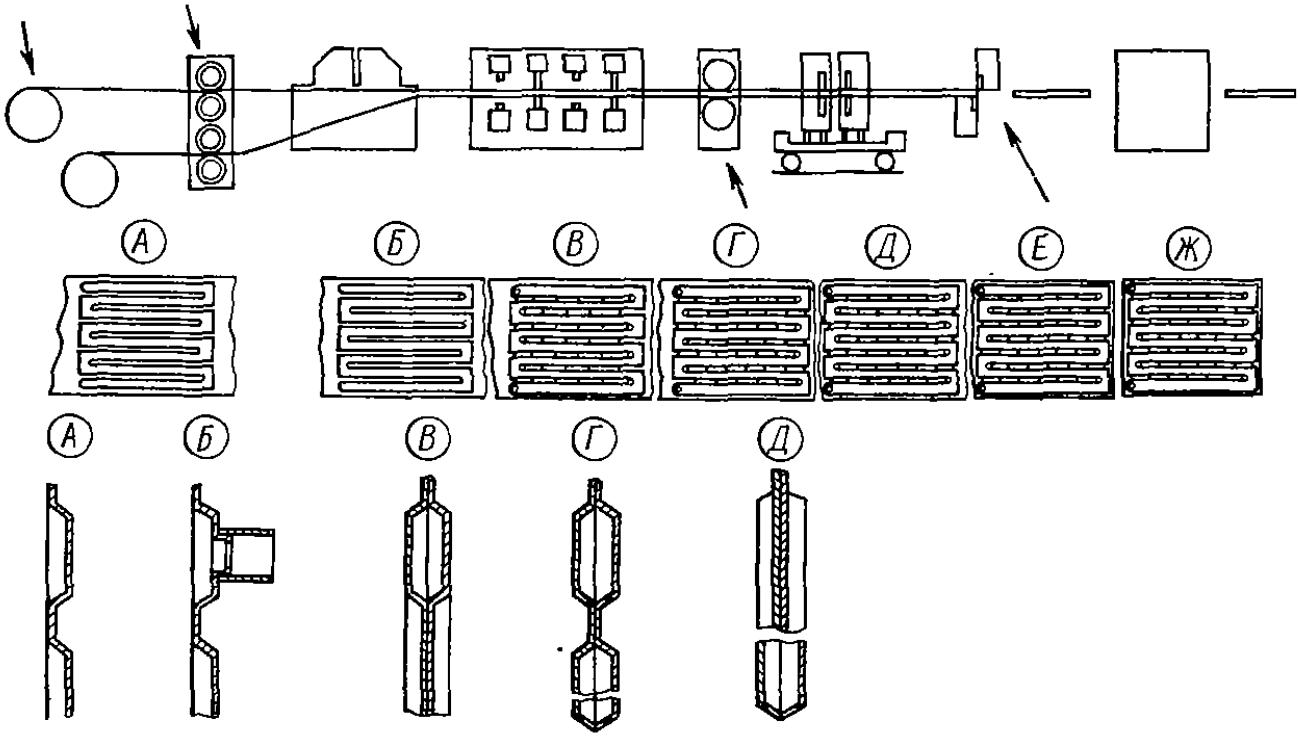


Рис. 6.13. Поточная линия сварки отопительных радиаторов

ствия, с качающимся вторичным контуром, поскольку она ставит точки на движущихся деталях. Сварка каждой точки происходит за 0,3—0,5 с. При скорости движения штампованных половин до 30 мм в секунду электродная система продвигается в процессе сварки точек на 9—15 мм. Это продвижение обеспечивается поворотом всей электродной системы вместе с пневмоцилиндрами только на 1—2°. Сила сжатия электродов обеспечивается за счет пневмосистемы и регулируется в пределах 3,7—5 кН.

В позиции *Г* производится шовная сварка продольных кромочных швов посредством двух специализированных шовных машин (рис. 6.14). Эти машины характеризуются тем, что линейная скорость сварки задается и обеспечивается скоростью движения все еще целой ленты со штампованными радиаторами. Роликовый узел снабжен дополнительной моторной системой *М* (рис. 6.14). Она с микрометрической точностью обеспечивает зачистку и формование рабочей части роликов по ходу движения радиаторов без остановки машин.

Следующей операцией является шовная сварка поперечных кромочных швов (позиция *Д*). Здесь действует еще одна специализированная шовная машина. Поскольку в следующей позиции *Е* непрерывная лента плоских радиаторов должна быть разрезана на отдельные радиаторы, то линия разреза должна, как видно, проходить между двумя кромочными швами. Они выполняются одновременно от двух трансформаторов *1*, расположенных также по обе стороны ленты, с помощью четырех роликов *2*, близко расположенных друг к другу (рис. 6.15). На платформе *3*, сцепленной с движущейся лентой, расположена вся система двухшовной машины, которая и ведет сварку поперечных швов по ходу движения

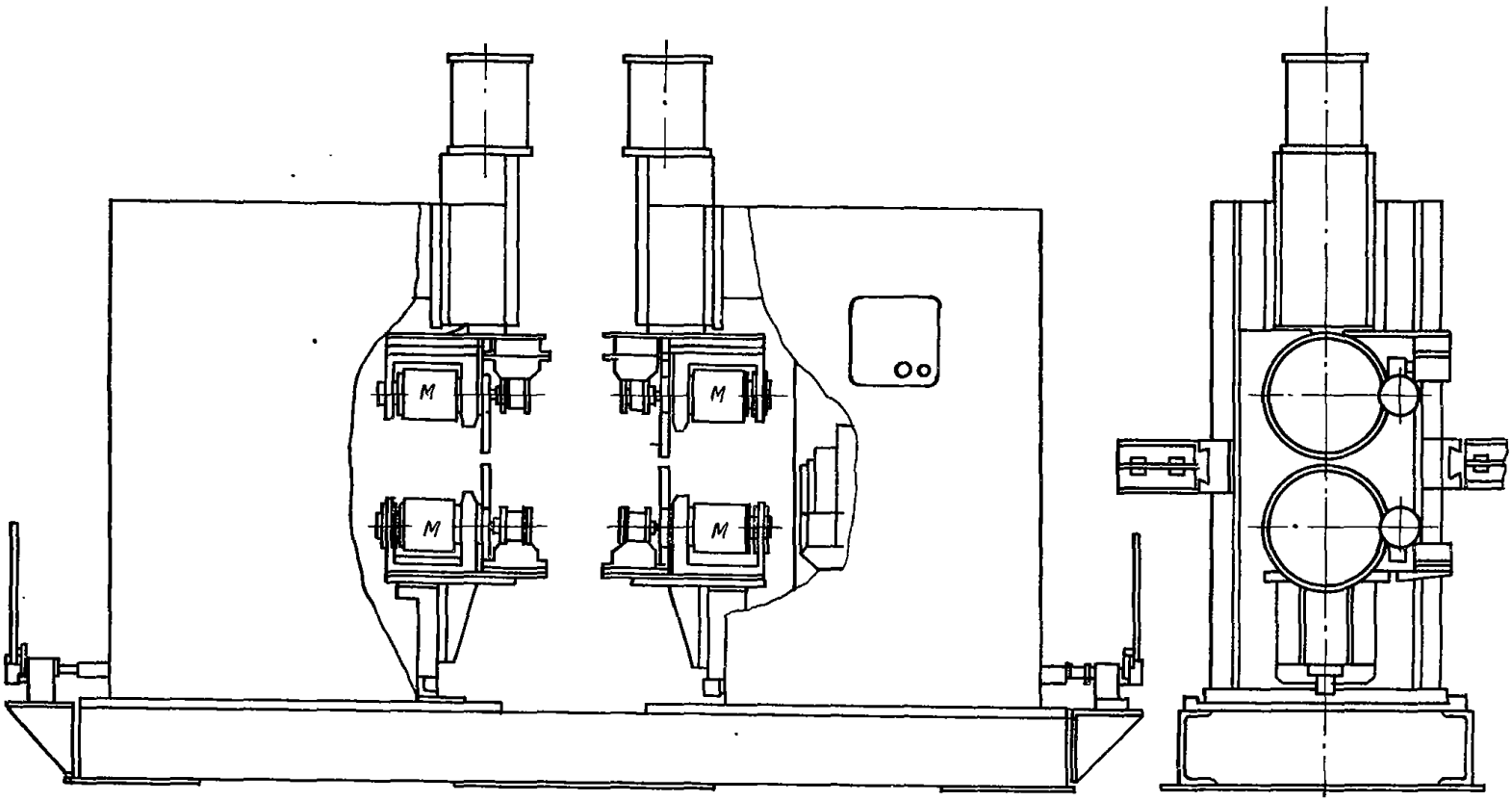


Рис. 6.14. Специализированная двухшовная машина для сварки радиаторов

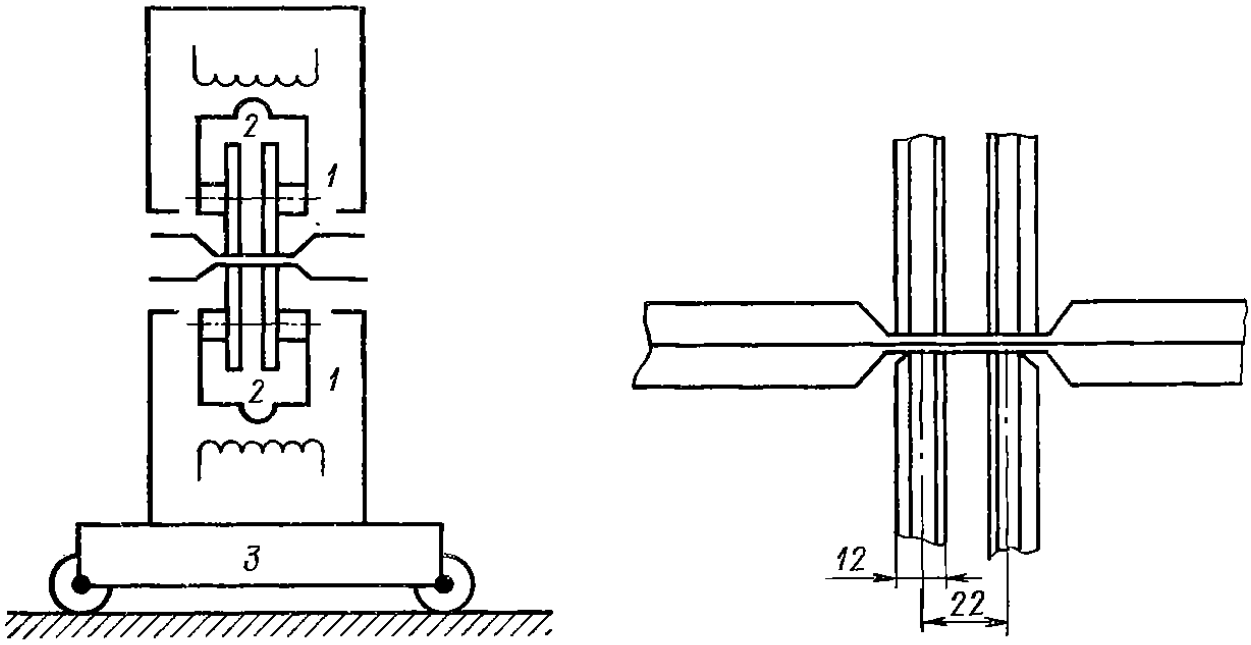


Рис. 6.15. Принципиальная схема специализированной двухшовной машины для сварки поперечных кромочных швов

пока еще целой ленты радиаторов. После окончания сварочного цикла платформа *3* с повышенной скоростью возвращает шовную машину против движения ленты для нового цикла поперечных швов.

В позиции *Е* расположены ножницы, которые рубят непрерывную ленту сваренных радиаторов на отдельные. Дальше (позиция *Ж*) идут окончательные отделочные операции, не относящиеся к контактной сварке. Линия в настоящее время обеспечивает в год до 380 тыс. радиаторов нескольких типоразмеров. Перестройка линии на разные размеры занимает всего несколько часов. Обслуживают линию два оператора. Стоимость всей линии 400 тыс. руб., собственно сварочного оборудования — 140 тыс. руб. Годовой экономический эффект линии — до 1 млн. руб. Установочная мощность механического оборудования 110 кВт, сварочное оборудование потребляет мощность до 1500 кВт. Предельная производительность линии может быть доведена до 500 000 радиаторов в год пяти разных типоразмеров.

Как видно, она спроектирована как гибкое автоматизированное производство и действует более 10 лет, и за этот срок не только все иовостроящиеся ленинградские дома были обеспечены стальными сварными радиаторами, но и другие города.

Опыт использования линии позволяет сделать некоторые полезные технологические выводы. Стальной рулон, из которого штампуются радиаторные заготовки, покрыт слоем масла. Вставлять в сварочный поток промежуточную операцию обезжиривания оказывается весьма трудно. Проделали массовые измерения прочностных свойств одиночных точек, сваренных на протравленном металле, и в состоянии поставки — на металле, покрытом слоем масла. При испытании на отрыв, т. е. при тех самых нагруз-

ках, на которые и работает здесь сварная точка, получили следующие результаты:

Диаметры точек, мм	5	7	8
Разрушающая сила для металла, кН:			
замасленного	2,5—2,7	3,6—4	3,8—4,2
протравленного .	1,6—2	3—3,7	3,4—3,7

Приведенные числа убедительно доказывают полную возможность не прибегать при точечной сварке к операции обезжиривания. Объяснить заметно повышенную прочность точек, сваренных на замасленном металле, пока, к сожалению, не удается.

Рабочее давление в радиаторе 0,6 МПа, испытуемое — 0,9 МПа. Диаметр точек обеспечивается от 7 до 8 мм, что гарантирует целость радиатора при давлении до 1,2 МПа, какое в редких аварийных ситуациях может возникнуть при одиночном гидравлическом ударе.

Таким образом, в предложенных режимах сварки обеспечивается достаточно высокое качество сварных соединений без трудоемких операций очистки исходного металла от консервирующего масляного слоя.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Здесь собраны и оформлены в виде таблиц справочные материалы, относящиеся непосредственно к контактной сварке. Систематизированы проверенные прочностные показатели типовых сварных соединений. Для некоторых металлов собраны основные физические, электрические и механические характеристики, без которых нельзя производить технологические расчеты.

Таблица 1. **Минимальные разрушающие усилия (кН) плоских одноточечных соединений деталей малой толщины при испытании на срез при нормальной температуре**

Толщина тонкой детали, мм	Ширина образца и нахлестки, мм	Временное сопротивление разрыву основного металла, МПа									
		130	130—200	200—320	320	500	500—600	600—700	700—800	800—900	900
		Алюминиевые и магниевые сплавы				Стали и титановые сплавы					
0,3	15	0,10	0,15	0,30	0,35	0,80	1,00	1,15	1,30	1,45	1,60
0,5	15	0,35	0,45	0,55	0,70	1,40	1,75	2,00	2,30	2,60	2,80
0,8	20	0,75	0,95	1,05	1,35	2,75	3,45	3,95	4,55	5,20	5,90
1,0	20	1,00	1,30	1,40	1,60	3,85	4,85	5,55	6,35	7,30	8,25
1,2	25	1,30	1,70	1,80	2,20	5,25	6,55	7,50	8,55	9,90	11,5
1,5	25	1,65	2,30	2,50	3,30	7,60	9,50	11,00	12,60	14,50	16,00
2,0	25	2,35	3,45	3,85	4,80	11,00	13,70	15,50	17,70	20,00	22,50
2,5	30	3,15	4,30	5,40	6,70	14,00	18,00	20,00	23,00	25,50	28,50
3,0	30	3,60	4,70	6,50	8,90	17,00	21,50	24,00	27,50	31,00	34,50

Таблица 2. **Минимальные разрушающие усилия (кН) плоских одиоточечных соединений при толщине деталей более 3 мм при испытании на срез при нормальной температуре**

Толщина тонкой детали, мм	Минимальный диаметр ядра точки, мм	Ширина образца и нахлестки, мм	Временное сопротивление разрыву основного металла, МПа				
			130	130—200	200—320	320	240—300
			Алюминневые сплавы			Магниевые сплавы	
3,0	9,0	30	3,60	4,90	6,50	8,9	5,5
3,5	10,5	40	4,85	6,70	8,80	12,0	7,1
4,0	12,0	40	6,5	8,50	11,00	15,0	8,5
5,0	14,0	50	11,0	13,50	18,75	26,0	12,5
6,0	16,0	50	—	18,25	25,50	34,5	17,0
7,0	18,0	60	—	22,00	30,50	41,5	20,0

Таблица 3. Средние разрушающие усилия (кН) одноточечных соединений при испытании на отрыв при нормальной температуре

Толщина детали, мм	Средний диаметр ядра, мм	Марка материала					
		МА2	АМг3	Д16АТ	В95АТ	ОТ4	12Х18Н9Т
0,3	3,0	—	—	110	—	0,38	1,25
0,5	3,5	—	0,18	0,23	0,20	0,60	1,90
0,8	4,0	0,25	0,35	0,40	0,45	1,35	3,85
1,0	4,5	0,40	0,48	0,65	0,60	2,00	5,75
1,2	5,5	0,75	0,80	1,05	1,00	2,90	7,80
1,5	6,5	1,00	1,00	1,45	1,40	4,75	11,50
2,0	7,5	2,00	1,70	2,40	2,30	7,65	16,60
3,0	9,5	3,55	4,50	5,20	4,85	12,10	25,50
4,0	13,0	—	—	8,90	7,70	—	33,40
5,0	15,0	—	—	12,70	11,40	—	—
6,0	17,0	—	—	18,60	17,70	—	—

Таблица 4. Физические характеристики металлов

Металл	Параметр решетки $b \cdot 10^{-10}$, м	Скорость звуковой волны в холодном металле, м/с	Звуковая частота колебаний атома $\nu_{зв} \cdot 10^{13}$	Число атомов в 1 см³, $n \cdot 10^{23}$	Средние значения энергии связи $E \cdot 10^{9}$, Дж/м³	Коэффициент внутреннего трения (диамнческой вязкости) $\eta_0 \cdot 10^{6}$, Дж·с/см³	Предел текучести холодного металла $\sigma_т$	
							нормальной поставки	предельно наклепанного
Титан	2,91	5100	1,75	0,575	56	940	4500	7500
Алюминий	2,86	5240	1,82	0,6	26	1028	600	1800
Медь	2,55	3840	1,5	0,85	42	1200	800	4000
Железо	2,48	5170	2,1	0,84	48,5	1836	2500	8500
Никель	2,49	4760	1,9	0,91	52,5	1632	1500	8000

Таблица 5. Параметры неровностей при различных способах обработки поверхности металла

Способы обработки поверхности	Расчетные коэффициенты		Размеры пирамиды, мкм	
	b	ν	высота Δ	основание a
Обдирка наждачным кругом	1—2	1,5—2	40—160	400—1200
Штамповка горячая	1—2	1,5—2	20—160	400—1200
» холодная	3—4	3	7—20	60—300
Строгание	2—3	2	10—80	100—500
Прокат холодный	6—8	3	3—10	400—1600
Шлифование:				
грубое	3—4	3	8—14	60—300
среднее	4—5	3	3—7	40—220
чистое	4—6	3	1,5—3	30—200
Зачистка наждачной бумагой	4—6	3	1,5—2	30—200
Полирование	5—10	3	0,3—1	12—100

Таблица 6. **Термодинамические характеристики металлов и сплавов**

Металл	Температура плавления, °С	Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м		Средние значения от 0° до $T_{пл}$, °С			$\gamma c \cdot 10^6$, Дж/(м³·°С)	$\gamma c\, T_{пл} \cdot 10^6$, Дж/м³	Температура кипения, °С
		ρ_0	ρ_T	λ, Вт/(м·°С)	a, см²/с	$T_{пл}\sqrt{\lambda\gamma c} \cdot 10^4$, Дж/(м²·с$^{1/2}$)			
Титан ОТ-4	1725	0,50	1,65	20	0,072	1337	2,8	5114	3000
Дюралюминий Д1	650	0,035	0,10	206	0,8	1527	2,7	1750	2060
Латунь Л62	900	0,09	0,16	195	0,525	2340	3,5	3150	—
Сталь Ст3	1450	0,20	1,40	41	0,08	2130	5,0	7850	2540
Медь М1	1083	0,018	0,08	335	0,82	4082	4,1	4450	2600
1Х18Н10Т	1450	0,70	1,30	24,4	0,953	1525	4,2	6100	—

Таблица 7. **Физические характеристики металлов и их оксидов**

Металл или оксид	Температура, °С		Энергия плавления, кДж/моль	Микротвердость, МПа	Удельные электрические сопротивления, Ом·м	
	плавления	кипения			при 15 °С	при температуре, °С
Al	660	2060	8	—	$3{,}5 \cdot 10$	плавления — $10 \cdot 10^{-8}$
Al_2O_3	2045	2980	113	20 000—24 000	10^{10}	660° — $4 \cdot 10^4$
Cu	1083	2600	11,5	—	$1{,}8 \cdot 10^{-8}$	плавления — $8 \cdot 10^{-8}$
CuO	1336	—	37	2 000—2 500	10^3	1000° — $0{,}1 \cdot 10^{-3}$
Cu_2O	1242	1800	56	20 000	10^3—10^5	1000° — $0{,}7 \cdot 10^{-3}$
Fe	1540	2740	15	—	$15 \cdot 10^{-8}$	плавления — $140 \cdot 10^{-8}$
FeO	1370—1427	2512—2623	29—34	6 000	—	600° — $0{,}15 \cdot 10^{-3}$ 1300° — $0{,}086 \cdot 10^{-3}$
Fe_3O_4	1580	2600	138	4 600—7 800	10^{-5}	1320° — $8 \cdot 10^{-7}$
Fe_2O_3	1350 1566	2420	—	6 800 6 800—12 000	—	600° — $0{,}62 \cdot 10^{-3}$ 1000° — $7 \cdot 10^1$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аксельрод Ф. А., Миркин А. М.** Оборудование для сварки давлением М.: Высш. шк., 1975. 238 с.

2. **Гуляев А. П.** Металловедение. — М.: Металлургия, 1978. 646 с.

3. **Гуляев А. И.** Технология точечной и рельефной сварки. — М.: Машиностроение, 1978. 245 с.

4. **Демкин Н. Б.** Фактическая площадь касания твердых тел. — М.: Изд-во АН СССР, 1962. 110 с.

5. **Кабанов Н. С., Слепак Э. Ш.** Технология стыковой контактной сварки. М.: Машиностроение, 1970. 263 с.

6. **Казаков Н. Ф.** Диффузионная сварка материалов. — М.: Машиностроение, 1976. 310 с.

7. **Кочергин К. А.** Сварка давлением. — Л.: Машиностроение, 1972. 214 с.

8. **Кухлинг Х.** Справочник по физике/Пер. с нем. — Мир, 1982. 519 с.

9. **Кучук-Яценко С. И., Лебедев В. К.** Контактная стыковая сварка непрерывным оплавлением. — Киев: Наукова думка, 1976. 212 с.

10. **Липа М., Голасек Я.** Контактная рельефная сварка/Пер. со словацкого. — Кнев: Техника, 1971. 320 с.

11. **Лыков А. В.** Теория теплопроводности. — М.: Высш. шк., 1967. 600 с.

12. **Моравский В. Э., Вороиа Д. С.** Технология и оборудование для точечной и рельефной конденсаторной сварки. — Киев: Наукова думка, 1985. 270 с.

13. **Нейман Л. Р., Демирчян К. С.** Теоретические основы электротехники.— Л.: Энергия, 1967. Т. 2. 410 с.

14. **Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А.** Сварные конструкции. — М.: Высш. шк., 1984. — 342 с.

15. **Патон Б. Е., Лебедев В. К.** Электрооборудование для контактной сварки. — М.: Машиностроение, 1969. 438 с.

16. **Попов В. М.** Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. — М.: Энергия. 1971. 213 с.

17. **Рыкалин Н. Н.** Тепловые процессы при контактной сварке. — М.: Изд-во АН СССР. 1959. 275 с.

18. **Френкель Я. И.** Введение в теорию металлов. — М.: Физматгиз, 1955. 368 с.

19. **Чулошников П. Л.** Точечная и роликовая электросварка легированных сталей и сплавов. — М.: Машиностроение, 1974. 230 с.

20. **Шавырин В. Н., Рязанцев В. И.** Клеесварные конструкции. — М.: Машиностроение, 1981. 156 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

Введение 4

Глава 1. Свариваемый контакт и процессы его активации 9

1.1. Структура и геометрия металлических поверхностей . . . . . —
1.2. Холодный металлический контакт 17
1.3. Физическая сущность активации свариваемых контактов . . . 23
1.4. Теория электрических сопротивлений свариваемых контактов . . . 45
1.5. Взаимодействие механической и электрической энергии с металлом при сварке 58

Глава 2. Основы теории процессов контактной сварки 65

2.1. Элементы теории потоков применительно к контактной сварке . . . —
2.2. Электрический ток в свариваемых деталях и конструкциях 72
2.3. Выделение теплоты в процессе протекания тока при стыковой сварке 81
2.4. Нагрев металла в процессе точечной и рельефной сварки 96
2.5. Особенности нагрева металла при шовной сварке 110

Глава 3. Технология стыковой сварки 113

3.1. Выбор способа стыковой сварки для типовых соединений . . . . . —
3.2. Формирование соединений при различных способах стыковой сварки 119
3.3. Расчет режимов стыковой сварки 125
3.4. Технологические циклы стыковой сварки 141
3.5. Энергетика свариваемых стыковых контактов 144

Глава 4. Технология точечной и рельефной сварки 155

4.1. Формирование точечно-сварных соединений . . . . . —
4.2. Технологические циклы точечной сварки 167
4.3. Расчет режимов точечной и рельефной сварки 174
4.4. Типовые конструкции для применения точечной и рельефной сварки 193
4.5. Технологическая оснастка сварочных контуров точечных и шовных машин 200
4.6. Прочностные свойства точечно-сварных соединений 206

Глава 5. Технология шовной сварки 208

5.1. Формирование соединений при контактной шовной сварке . . . . . —
5.2. Расчет режимов шовной сварки 210

Глава 6. Контактные машины и организация производства контактной сварки 213

6.1. Общие сведения о машинах для контактной сварки . . . . . —
6.2. Технологические характеристики контактных машин 220
6.3. Проектирование технологии контактной сварки и выбор контактных машин 227
6.4. Поточные линии контактной сварки 231

Приложение 236

Список литературы 239