Сварка
В МАШИНОСТРОЕНИИ

СПРАВОЧНИК 2

Сварка
В МАШИНОСТРОЕНИИ

Справочник в 4 томах

Редакционная коллегия:

Заслуженный деятель науки и техники РСФСР,
Герой Социалистического Труда, чл.-кор. АН СССР,
Лауреат Государственной премии Г. А. НИКОЛАЕВ (председатель);
Чл.-кор. АН УССР, д-р техн. наук В. И. МАХНЕНКО;
Заслуженный деятель науки и техники РСФСР,
д-р техн. наук проф. Н. А. ОЛЬШАНСКИЙ;
Лауреат Ленинской премии д-р техн. наук проф. А. И. АКУЛОВ;
д-р техн. наук В. А. ВИНОКУРОВ;
канд. техн. наук доц. Ю. Н. ЗОРИН

Сварка
В МАШИНОСТРОЕНИИ

ТОМ 2

Под редакцией д-ра техн. наук
А. И. АКУЛОВА

57243
Библиотека
ВИ(ф) ЮРГТУ (

Москва «Машиностроение» 1978

ББК 30.616
С 24
УДК 621.791(031)

Авторы:

д-р техн. наук А. И. АКУЛОВ, канд. техн. наук Г. А. АСИНОВСКАЯ, д-р техн. наук В. В. БАЖЕНОВ, инж. Д. Н. БАРАНОВ, д-р техн. наук. Г. А. БЕЛЬЧУК, канд. техн. наук В. С. ВИНОГРАДОВ, инж. Ю. И. ЖУРАВИЦКИЙ, канд. техн. наук К. И. ЗАЙЦЕВ, д-р техн. наук проф. В. Н. ЗЕМЗИН, канд. техн. наук К. П. ИМШЕННИК, канд. техн. наук В. Н. КРЮКОВСКИЙ, канд. техн. наук С. П. НЕШУМОВА, д-р техн. наук Г. Д. НИКИФОРОВ, д-р техн. наук проф. Н. А. ОЛЬШАНСКИЙ, д-р техн. наук проф. Г. Л. ПЕТРОВ, д-р техн. наук проф. О. И. СТЕКЛОВ, д-р техн. наук проф. В. В. ФРОЛОВ, канд. техн. наук доц. Г. Г. ЧЕРНЫШОВ, канд. техн. наук Д. М. ШАШИН, д-р техн. наук проф. Н. В. ШИГАНОВ.

Рецензенты:

д-р техн. наук проф. Н. Ф. КАЗАКОВ, канд. техн. наук Г. В. КОМАРОВ, канд. техн. наук В. И. ЛЕВЧЕНКОВ.

Сварка в машиностроении: Справочник. В 4-х т. /Ред-
С 24 кол.: Г. А. Николаев (пред.) и др. — М.: Машиностроение, 1978 — — т. 2 /Под ред. А. И. Акулова. 1978. 462 с., ил.
В пер.: 2 р. 50 к.

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

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

С $\frac{31206\text{-}605}{038(01)\text{-}78}$ подписное

ББК 30.616
6П4.3

© Издательство «Машиностроение», 1978 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 1. СВАРОЧНЫЕ И НАПЛАВОЧНЫЕ ПРОВОЛОКИ, ПРУТКИ И ЛЕНТЫ. НЕПЛАВЯЩИЕСЯ ЭЛЕКТРОДЫ (*Д. Н. Баранов*)

Стальная сварочная проволока 9
Сварочная проволока из алюминия и алюминиевых сплавов 9
Сварочные проволока и прутки из меди и сплавов на медной основе 19
Наплавочная стальная проволока 21
Чугунные прутки для сварки и наплавки 26
Порошки для наплавки 30
Неплавящиеся электроды 31
Литые прутки для наплавки 33
Самозащитная и порошковая проволоки 33
Наплавочные ленты 34
Присадочные материалы для электрошлаковой сварки 34
Присадочные кольца и вставки для выполнения корневого слоя шва при сварке труб 35

Глава 2. ПОКРЫТЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ И НАПЛАВКИ (*Д. Н. Баранов*) 36

Классификация, размеры, общие технические требования и методы испытаний электродов для сварки сталей и наплавки 36
Типы покрытых электродов для ручной дуговой сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей 52
Типы покрытых электродов для ручной дуговой сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами 57
Типы покрытых электродов для ручной дуговой наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами 65
Наиболее распространенные марки электродов для сварки сталей 67
Покрытые электроды для ручной дуговой сварки чугуна и цветных металлов 68
Производство покрытых электродов 69

Глава 3. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ГАЗОПЛАМЕННОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ (*С. П. Нешумова*) 71

Свойства газообразного и жидкого кислорода 71
Свойства горючих газов 72
Горючие — заменители ацетилена 79
Список литературы 82

Глава 4. МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ (*Д. М. Шашин*) 83

Список литературы 86

Глава 5. СВАРКА КОНСТРУКЦИОННЫХ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ *(А. И. Акулов)* 87

Состав и свойства сталей 87
Общие сведения о свариваемости 90
Ручная дуговая сварка покрытыми электродами 102
Сварка под флюсом 102
Дуговая сварка в защитных газах 107
Сварка порошковой проволокой и проволокой сплошного сечения без дополнительной защиты 109
Электрошлаковая сварка 110
Контактная сварка 110
Список литературы 115

Глава 6. СВАРКА КОНСТРУКЦИОННЫХ СРЕДНЕ- И ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТЫХ И ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ *(Н. В. Шиганов)* 116

Классификация и основные свойства 116
Общие сведения о свариваемости 119
Некоторые особенности сварки 123
Механические свойства и структура сварных соединений 125
Общие рекомендации по сварке 130
Ручная дуговая сварка 133
Автоматическая сварка под флюсом 135
Сварка в защитных газах 138
Электронно-лучевая сварка 145
Точечная и роликовая сварка 147
Газовая и атомно-водородная сварка 148
Список литературы 150

Глава 7. СВАРКА ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ *(В. В. Баженов)* 151

Общие сведения о свариваемости 151
Дуговая сварка 152
Контактная сварка 157
Список литературы 158

Глава 8. СВАРКА ВЫСОКОХРОМИСТЫХ МАРТЕНСИТНЫХ, МАРТЕНСИТНО-ФЕРРИТНЫХ И ФЕРРИТНЫХ СТАЛЕЙ *(Г. Л. Петров)* 159

Основные свойства и классификация сталей. 159
Общие рекомендации по сварке. 165
Сварка мартенситных и мартенситно-ферритных сталей 171
Сварка высокохромистых ферритных сталей 179
Список литературы 183

Глава 9. СВАРКА АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ *(А. И. Акулов, Г. Г. Чернышов)* 184

Основные свойства и классификация 184
Особенности сварки 191
Общие технологические условия сварки 195
Основные способы сварки 202
Ручная дуговая сварка 202
Сварка под флюсом 204
Электрошлаковая сварка 207
Сварка в защитных газах 208
Электронно-лучевая сварка 214
Диффузионная сварка в вакууме 215

Контактная сварка 216
Сварка трением 220
Список литературы 220

Глава 10. СВАРКА АЛЮМИНИЯ, АЛЮМИНИЕВЫХ И МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ *(Г. Д. Никифоров, В. С. Виноградов)* 221

Сварка алюминия и алюминиевых сплавов 221
Основные свойства и особенности сварки 224
Технология сварки 228
Свойства сварных соединений 237
Сварка магниевых сплавов 239
Основные свойства и особенности сварки 239
Технология сварки 240
Свойства сварных соединений 243
Список литературы 245

Глава 11. СВАРКА МЕДИ, СВИНЦА, БЕРИЛЛИЯ, СЕРЕБРА И ИХ СПЛАВОВ *(В. В. Фролов, В. Н. Крюковский)* 246

Сварка бериллия 246
Сварка свинца 248
Сварка серебра и биметалла сталь—серебро. 250
Сварка меди и медных сплавов 252
Список литературы 267

Глава 12. СВАРКА НИКЕЛЯ И НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ *(А. И. Акулов)* 269

Состав и свойства никеля и никелевых сплавов 269
Некоторые особенности процесса сварки 274
Газовая сварка 275
Ручная дуговая сварка 277
Сварка под флюсом и электрошлаковая сварка 279
Аргонодуговая сварка 279
Диффузионная и электронно-лучевая сварка 285
Контактная сварка 286
Список литературы 288

Глава 13. СВАРКА ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ И ИХ СПЛАВОВ *(О. И. Стеклов)* 289

Общие сведения 289
Сварка титана, циркония и гафния 295
Сварка титана и титановых сплавов 296
Сварка циркония и гафния 320
Сварка ванадия, ниобия и тантала 322
Сварка хрома, молибдена, вольфрама 326
Сварка тугополавких платиновых металлов 330
Список литературы 330

Глава 14. СВАРКА РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ, МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ *(Г. А. Бельчук, В. Н. Земзин)* 332

Сварка разнородных сталей 332
Особенности сварки 332
Свойства сварных соединений 339
Сварка разнородных сталей одного структурного класса 342
Сварка сталей разного структурного класса 344

Сварка разнородных металлов и сплавов 347
Особенности сварки 347
Сварка стали с цветными металлами и их сплавами 353
Сварка разнородных цветных металлов и сплавов 359
Применение биметалла для получения сварных соединений разнородных металлов 362
Список литературы 363

Глава 15. СВАРКА ЧУГУНА *(Г. А. Асиновская, Ю. И. Журавицкий)* 365

Классификация и свойства чугуна 365
Свариваемость чугуна 368
Общие рекомендации по сварке 371
Дуговая сварка с предварительным нагревом (горячая сварка) 376
Дуговая сварка без предварительного нагрева (холодная сварка) 380
Газовая сварка 385
Пайкосварка 388
Особые виды сварки 390

Глава 16. СВАРКА И ПАЙКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ *(К. П. Имшенник)* 392

Основные свойства инструментальных материалов и особенности получения сварных и паяных соединений инструментальных материалов со сталью 392
Технология контактной стыковой сварки оплавлением и сварки трением заготовок инструмента 399
Технология пайки заготовок твердосплавного инструмента 408
Технология пайки заготовок быстрорежущего инструмента 412
Список литературы 414

Глава 17. ПАЙКА И СВАРКА НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ *(Н. А. Ольшанский, К. И. Зайцев)* 415

Пайка и сварка керамики с металлами 415
Пайка и сварка графита 429
Сварка пластмасс 434
Список литературы 449
Приложение 450

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ 454

Глава 1
СВАРОЧНЫЕ И НАПЛАВОЧНЫЕ ПРОВОЛОКИ, ПРУТКИ И ЛЕНТЫ. НЕПЛАВЯЩИЕСЯ ЭЛЕКТРОДЫ

СТАЛЬНАЯ СВАРОЧНАЯ ПРОВОЛОКА

При сварке сталей в основном используют холоднотянутую стальную сварочную проволоку по ГОСТ 2246—70, который предусматривает изготовление проволоки семидесяти пяти марок.

Классификация и обозначения. В зависимости от уровня легирования сварочная проволока по ГОСТ 2246—70 подразделяется на низкоуглеродистую, легированную и высоколегированную.

Низкоуглеродистую проволоку изготовляют шести марок: Св-08, Св-08А, Св-08АА, Св-08ГА, Св-10ГА и Св-10Г2.

Легированную проволоку изготовляют тридцати марок: Св-08ГС, Св-12ГС, Св-08Г2С, Св-10ГН, Св-08ГСМТ, Св-15ГСТЮЦА (ЭП-439), Св-20ГСТЮА, Св-18ХГС, Св-10НМА, Св-08МХ, Св-08ХМ, Св-18ХМА, Св-08ХНМ, Св-08ХМФА, Св-10ХМФТ, Св-08ХГ2С, Св-08ХГСМА, Св-10ХГ2СМА, Св-08ХГСМФА, Св-04Х2МА, Св-13Х2МФТ, Св-08Х3Г2СМ, Св-08ХМНФБА, Св-08ХН2М, Св-10ХН2ГМТ (ЭИ-984), Св-08ХН2ГМТА (ЭП-111), Св-08ХН2ГМЮ, Св-08ХН2Г2СМЮ, Св-06Н3 и Св-10Х5М.

Высоколегированную проволоку изготовляют тридцати девяти марок: Св-12Х11НМФ, Св-10Х11НВМФ, Св-12Х13, Св-20Х13, Св-06Х14, Св-08Х14ГНТ, Св-10Х17Т, Св-13Х25Т, Св-01Х19Н9, Св-04Х19Н9, Св-08Х16Н8М2 (ЭП-377), Св-08Х18Н8Г2Б (ЭП-307), Св-07Х18Н9ТЮ, Св-06Х19Н9Т, Св-04Х19Н9С2, Св-08Х19Н9Ф2С2, Св-05Х19Н9Ф3С2, Св-07Х19Н10Б, Св-08Х19Н10Г2Б (ЭИ-898), Св-06Х19Н10М3Т, Св-08Х19Н10М3Б (ЭИ-902), Св-04Х19Н11М3, Св-05Х20Н9ФБС (ЭИ-649), Св-06Х20Н11М3ТБ (ЭП-89), Св-10Х20Н15, Св-07Х25Н12Г2Т (ЭП-75), Св-06Х25Н12ТЮ (ЭП-87), Св-07Х25Н13, Св-08Х25Н13БТЮ (ЭП-389), Св-13Х25Н18, Св-08Х20Н9Г7Т, Св-08Х21Н10Г6, Св-30Х25Н16Г7, Св-10Х16Н25АМ6, Св-09Х16Н25М6АФ (ЭИ-981А), Св-01Х23Н28М3Д3Т (ЭП-516), Св-30Х15Н35В3Б3Т, Св-08Н50 и Св-06Х15Н60М15 (ЭП-367).

В зависимости от назначения стальную сварочную проволоку подразделяют на проволоку для сварки (наплавки) и проволоку для изготовления электродов (условное обозначение Э). Подразделение проволоки по назначению обусловлено более жесткими предельными отклонениями по диаметру проволоки для изготовления электродов. Назначение проволоки следует оговаривать в заказе.

По виду поверхности низкоуглеродистую и легированную проволоку подразделяют на неомедненную и омедненную (О). Специальные требования к омеднению поверхности проволоки (включая суммарное содержание меди) устанавливаются техническими условиями. Необходимость поставки проволоки с омедненной поверхностью оговаривается в заказе.

По требованию потребителя проволока должна изготовляться из стали, выплавленной электрошлаковым (Ш) или вакуумно-дуговым (ВД) переплавом или в вакуумно-индукционных печах (ВИ). При этом дополнительные требования к металлу проволоки (ужесточение норм по содержанию вредных и посторонних примесей, введение ограничений по содержанию газов, неметаллических включений и т. п.) устанавливаются соглашением сторон.

В условном обозначении сварочной проволоки указывают диаметр и марку проволоки, приведенные выше индексы, характеризующие способ выплавки стали, назначение и вид поверхности проволоки, а также обозначение стандарта.

Примеры условных обозначений. Проволока сварочная диаметром 3 мм, марки Св-08А, предназначенная для сварки (наплавки), с неомедненной поверхностью:

Проволока 3 Св-08А ГОСТ 2246—70

Проволока сварочная диаметром 4 мм, марки Св-04Х19Н9, предназначенная для изготовления электродов:

Проволока 4 Св-04Х19Н9 — Э ГОСТ 2246—70

Проволока сварочная диаметром 2 мм, марки Св-30Х25Н16Г7, предназначенная для сварки (наплавки), из стали, выплавленной электрошлаковым переплавом:

Проволока 2 Св-30Х25Н16Г7 — Ш ГОСТ 2246—70

Проволока сварочная диаметром 1,6 мм, марки Св-08Г2С, предназначенная для сварки (наплавки), с омедненной поверхностью:

Проволока 1,6 Св-08Г2С — О ГОСТ 2246—70

Проволока сварочная диаметром 2,5 мм, марки Св-08ХГСМФА, предназначенная для изготовления электродов, из стали, выплавленной в вакуумно-индукционной печи, с омедненной поверхностью:

Проволока 2,5 Св-08ХГСМФА — ВИ — Э — О ГОСТ 2246—70

Технические требования. Диаметры проволоки и их предельные отклонения должны соответствовать указанным в табл. 1. Для высоколегированной проволоки, подвергаемой травлению, допускается увеличение предельных отклонений по диаметру в 1,5 раза от значений, указанных в табл. 1. Овальность проволоки не должна превышать половины предельного отклонения по диаметру.

1. Диаметры проволоки и их предельные отклонения, мм

Номинальный диаметр проволоки	Предельные отклонения для провслоки, предназначенной для		Номинальный диаметр проволоки	Предельные отклонения для проволоки, предназначенной для	
	сварки (наплавки)	изготовления электродов		сварки (наплавки)	изготовления электродов
0,3 0,5 0,8	—0,05 —0,06 —0,07	—	2,5 3,0	—0,12	—0,09
1,0 1,2 1,4 1,5	—0,09	—	4,0 5,0 6,0	—0,16	—0,12
			8,0	—0,20	—0,16
1,6 2,0	—0,12	—0,06	10,0 12,0	—0,24	—

Проволоку изготовляют из стали, химический состав которой в зависимости от марки проволоки приведен в табл. 2.

По требованию потребителя содержание углерода в проволоке марки Св-08ГСМТ должно составлять 0,08—0,14%; в этом случае проволоку обозначают Св-10ГСМТ. По соглашению сторон допускается поставка проволоки марок Св-08МХ, Св-08ХМ и Св-08ХМФА с содержанием углерода 0,08—0,13%; в этом случае проволоку обозначают Св-10МХ, Св-10ХМ и Св-10ХМФА соответственно. Допускается увеличение содержания углерода до 0,15% в проволоке марки Св-12Х13 и до 0,10% в проволоке марки Св-07Х19Н10Б. В проволоке марки Св-07Х25Н13, предназначенной для сварки (наплавки), содержание хрома должно быть не ниже 23,5%. По соглашению сторон в проволоке марки Св-08Х21Н10Г6 отношение содержания хрома к содержанию никеля должно быть не менее двух.

2. Химический состав стали проволоки, %

Марка проволоки	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	S	P	Прочие элементы
Низкоуглеродистая проволока								не более		
Св-08	0,10	0,03	0,35—0,60	0,15	0,30	—	—	0,040	0,040	0,01 Al
Св-08А	0,10	0,03	0,35—0,60	0,12	0,25	—	—	0,030	0,030	0,01 Al
Св-08АА	0,10	0,03	0,35—0,60	0,10	0,25	—	—	0,020	0,020	0,01 Al
Св-08ГА	0,10	0,06	0,80—1,10	0,10	0,25	—	—	0,025	0,030	—
Св-10ГА	0,12	0,06	1,10—1,40	0,20	0,30	—	—	0,025	0,030	—
Св-10Г2	0,12	0,06	1,50—1,90	0,20	0,30	—	—	0,030	0,030	—
Легированная проволока										
Св-08ГС	0,10	0,60—0,85	1,40—1,70	0,20	0,25	—	—	0,025	0,030	—
Св-12ГС	0,14	0,60—0,90	0,80—1,10	0,20	0,30	—	—	0,025	0,030	—
Св-08Г2С	0,11	0,70—0,95	1,80—2,10	0,20	0,25	—	—	0,025	0,030	—
Св-10ГН	0,12	0,15—0,35	0,90—1,20	0,20	0,90—1,20	0,20—0,40	0,05—0,12	0,025	0,030	—
Св-08ГСМТ	0,11	0,40—0,70	1,00—1,30	0,30	0,30	—	0,05—0,20	0,020	0,030	—
Св-15ГСТЮЦА	0,18	0,45—0,85	0,60—1,00	0,30	0,40	—	—	0,025	0,025	—
Св-20ГСТЮА	0,23	0,60—0,90	0,90—1,20	0,30	0,40	—	0,10—0,20	0,025	0,030	—
Св-18ХГС	0,22	0,90—1,20	0,80—1,10	0,80—1,10	0,30	0,40—0,55	—	0,025	0,025	—
Св-10НМА	0,12	0,12—0,35	0,40—0,70	0,45—0,65	1,00—1,50	0,40—0,60	—	0,025	0,030	—
Св-08МХ	0,10	0,12—0,30	0,35—0,60	0,90—1,20	0,30	0,50—0,70	—	0,025	0,030	—
Св-08ХМ	0,10	0,12—0,30	0,35—0,60	0,90—1,20	0,30	0,15—0,30	—	0,025	0,030	—
Св-18ХМА	0,22	0,12—0,35	0,40—0,70	1,80—2,20	0,30	0,25—0,45	—	0,025	0,025	—
Св-08ХНМ	0,10	0,12—0,35	0,50—0,80	0,70—0,90	0,80—1,20	0,50—0,70	—	0,025	0,030	—
Св-08ХМФА	0,10	0,12—0,30	0,35—0,60	0,90—1,20	0,30	0,50—0,70	0,05—0,12	0,025	0,030	0,15—0,30 V 0,20—0,35 V
Св-08ХМФТ	0,12	0,35	0,40—0,70	1,40—1,80	0,30	0,40—0,60	—	0,025	0,030	—
Св-08ХГ2С	0,11	0,70—0,95	1,70—2,10	0,70—1,00	0,30	0,40—0,60	—	0,025	0,025	—
Св-08ХГСМА	0,10	0,45—0,70	1,15—1,45	0,85—1,15	0,30	0,40—0,60	—	0,025	0,025	—
Св-10ХГ2СМА	0,12	0,60—0,90	1,70—2,10	0,80—1,10	0,30	0,50—0,70	—	0,025	0,025	—
Св-08ХГСМФА	0,10	0,45—0,70	1,20—1,50	0,95—1,25	0,25	0,50—0,70	—	0,025	0,025	—
Св-04Х2МА	0,06	0,12—0,35	0,40—0,70	1,80—2,20	0,20	0,40—0,60	0,05—0,12	0,020	0,025	0,20—0,35 V —
Св-13Х2МФТ	0,15	0,35	0,40—0,70	1,70—2,20	0,30	0,30—0,50	—	0,030	0,030	0,20—0,35 V —
Св-08Х3Г2СМ	0,10	0,45—0,75	2,00—2,50	2,00—3,00	0,40	0,80—1,00	—	0,025	0,025	0,20—0,35 V; 0,10—0,23 Nb
Св-08ХМНФБА	0,06—0,10	0,12—0,30	0,35—0,60	1,10—1,40	0,65—0,90	—	—	—	—	—
Св-08Х21Н10Г6	0,10	0,12—0,30	0,55—0,85	0,70—1,00	1,40—1,80	0,20—0,40	—	0,025	0,030	—

Продолжение табл. 2

Марка проволоки	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti	S	P	Прочие элементы
								не более		
Св-06Х25Н12ТЮ	⩽ 0,08	0,60—1,00	⩽ 0,80	24,00—26,50	11,50—13,50	—	0,60—1,00	0,020	0,030	0,40—0,80 Al
Св-07Х25Н13	⩽ 0,09	0,50—1,00	1,00—2,00	23,00—26,00	12,00—14,00	—	—	0,018	0,025	—
Св-08Х25Н13БТЮ	⩽ 0,10	0,60—1,00	⩽ 0,55	24,00—26,00	12,00—14,00	—	0,50—0,90	0,020	0,030	0,70—1,10 Nb; 0,40—0,90 Al
Св-13Х25Н18	⩽ 0,15	⩽ 0,50	1,00—2,00	24,00—26,50	17,00—20,00	—	—	0,015	0,025	—
Св-08Х20Н9Г7Т	⩽ 0,10	0,50—1,00	5,00—8,00	18,50—22,00	8,00—10,00	—	0,60—0,90	0,018	0,035	—
Св-08Х21Н10Г6	⩽ 0,10	0,20—0,70	5,00—7,00	20,00—22,00	9,00—11,00	—	—	0,018	0,035	—
Св-30Х25Н16Г7	0,25—0,33	⩽ 0,30	6,00—8,00	24,50—27,00	15,00—17,00	—	—	0,018	0,030	—
Св-10Х16Н25АМ6	0,08—0,12	⩽ 0,60	1,00—2,00	15,00—17,00	24,00—27,00	5,50—7,00	—	0,018	0,025	0,10—0,20 N
Св-09Х16Н25М6АФ	0,07—0,11	⩽ 0,40	1,00—2,00	15,00—17,00	24,00—27,00	5,50—7,00	—	0,018	0,018	0,70—1,00 V; 0,10—0,20N
Св-01Х23Н28М3Д3Т	⩽ 0,03	⩽ 0,55	⩽ 0,55	22,00—25,00	26,00—29,00	2,50—3,00	0,50—0,90	0,018	0,030	2,50—3,50 Cu
Св-30Х15Н35В3Б3Т	0,27—0,33	⩽ 0,60	0,50—1,00	14,00—16,00	34,00—36,00	—	0,20—0,70	0,015	0,025	2,50—3,50 W; 2,80—3,50 Nb
Св-08Н50	⩽ 0,10	⩽ 0,50	⩽ 0,50	⩽ 0,30	48,00—53,00	—	—	0,020	0,030	—
Св-06Х15Н60М15	⩽ 0,08	⩽ 0,50	1,00—2,00	14,00—16,00	Основа	14,00—16,00	—	0,015	0,015	⩽ 4,0 Fe

Примечания: 1. Условные обозначения марок проволоки состоят из индекса Св (сварочная) и следующих за ним цифр и букв.

2. Цифры, следующие за индексом Св, указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента.

3. Химические элементы, содержащиеся в металле проволок, обозначены следующими буквами: А — азот (только в высоколегированных проволоках); Б — ниобий; В — вольфрам; Г — марганец; Д — медь; М — молибден; Н — никель; С — крем-

При соблюдении остальных требований ГОСТ 2246—70 допускается поставка проволоки с отклонением по содержанию одного из химических элементов от норм, приведенных в табл. 2. Допускаемые отклонения должны соответствовать указанным в табл. 3. С согласия потребителя, при условии соблюдения допускаемых отклонений, указанных в табл. 3, разрешается поставка проволоки с отклонениями по содержанию нескольких химических элементов от норм, приведенных в табл. 2.

3. Допускаемые отклонения по содержанию химических элементов, %

Химический элемент	Фактическое содержание в проволоке	Допускаемые отклонения
C	От 0,08 до 0,12 Св. 0,12	+0,01 ±0,01
Mn	От 0,60 до 1,20 Св. 1,20	±0,02 ±0,05
Si	От 0,35 до 0,85 Св. 0,85	±0,02 ±0,05
Nb	От 0,30 до 0,90 Св. 0,90	±0,02 ±0,05
Ni	От 0,30 до 0,90 Св. 0,90 » 1,80 » 1,80 » 7,00 » 7,00	±0,02 ±0,05 ±0,10 ±0,15
Cr	От 0,30 до 1.20 Св. 1.20 » 2,50 » 2,50 » 7,00 » 7,00	±0,02 ±0,05 ±0,15 ±0,20
Ti	От 0,20 до 0,80 Св. 0,80	±0,02 ±0,05
V	От 0,35 до 1,50 Св. 1,50	±0,02 ±0,05
W	От 1,00 до 2,50 Св. 2,50	±0,05 ±0,10
Mo	От 0,30 до 1,00 Св. 1,00 » 3,00 » 3,00	±0,02 ±0,05 ±0,10
Al	От 0,10 до 0,30 Св. 0,30	±0,02 ±0,04

В проволоку марки Св-20ГСТЮА церий вводят по расчету и химическим анализом не определяют.

В низкоуглеродистой и легированной проволоке содержание мышьяка должно быть не более 0,08%.

С согласия потребителя в проволоке марок Св-08 и Св-08А допускается остаточное содержание алюминия до 0,05%. В низкоуглеродистой проволоке марок Св-08ГА, Св-10ГА и Св-10Г2 и легированной проволоке (не легированной алюминием) остаточное содержание алюминия не должно превышать 0,05%.

В проволоке, не легированной молибденом, остаточное содержание молибдена не должно превышать 0,15% в легированной проволоке и 0,25% в высоколегированной проволоке.

В проволоке, не легированной титаном, остаточное содержание титана не должно превышать 0,04% в легированной проволоке и 0,2% в высоколегированной проволоке. По требованию потребителя в проволоке марок Св-04Х19Н11М3 и Св-08Х21Н10Г6 остаточное содержание титана не должно превышать 0,1%.

В легированной проволоке, не легированной ванадием, остаточное содержание ванадия не должно превышать 0,05%, за исключением проволоки марок Св-08Х3Г2СМ и Св-10Х5М, в которых остаточное содержание ванадия допускается до 0,08%.

В проволоке, не легированной медью, остаточное содержание меди не должно превышать 0,25%. По требованию потребителя остаточное содержание меди должно быть не более 0,2%. Приведенные требования по остаточному содержанию меди относятся к проволоке с неомедненной поверхностью.

Проволока марок Св-08Х16Н8М2, Св-08Х18Н8Г2Б и Св-04Х19Н11М3 должна иметь регламентированное содержание ферритной фазы: 2—6% в проволоке двух первых марок и 3—8% — в проволоке третьей марки. В проволоке перечисленных марок допускается повышение содержания хрома до 1% сверх норм, приведенных в табл. 2. Для проволоки марок Св-01Х19Н9, Св-04Х19Н9, Св-06Х19Н9Т, Св-08Х19Н10Г2Б, Св-08Х19Н10М3Б и Св-07Х25Н13 содержание ферритной фазы регламентируется по соглашению сторон; при этом допускается повышение содержания хрома до 2%, а никеля до 1% по сравнению с нормами, приведенными в табл. 2.

Содержание азота в проволоке не должно превышать норм, приведенных в табл. 4.

4. Допустимое содержание азота в проволоке

Группа проволоки	Марка проволоки	N, %, не более	Группа проволоки	Марка проволоки	N, %, не более
1	Св-08АА	0,008	4	Св-10Х Н2ГМТ,	0,015
2	Св-08А, Св-08ГА, Св-10ГА, Св-10Г2, Св-08ГС, Св-12ГС, Св-08Г2С, Св-10Г Н, Св-08ГСМТ, Св-10НМА	0,010		Св-08Х Н2ГМТА, Св-08Х Н2ГМЮ, Св-08Х Н2Г2СМЮ, Св-06Н3	
3	Св-08МХ, Св-08ХМ, Св-18ХМА, Св-08ХНМ, Св-08ХМФА	0,012	5	Св-08ХГ2С, Св-10ХГ2СМА, Св-04Х2МА, Св-13Х2МФТ, Св-08Х3Г2СМ	0,018
4	Св-18ХГС, Св-10ХМФТ, Св-08ХГСМА, Св-08ХГСМФА, Св-08ХМНФБА, Св-08ХН2М,	0,015	6	Св-10Х5М	0,020
			7	Св-08Х19Н10Г2Б, Св-08Х19Н10М3Б, Св-07Х25Н13	0,050

Примечания: 1. Проволоку 1, 2 и 3-й групп изготовляют из стали, выплавленной в мартеновских печах.

2. В проволоке 2-й группы с согласия потребителя допускается содержание азота до 0,012%.

3. До 01.01.1981 г. в проволоке 4, 5 и 6-й групп, за исключением проволоки марок Св-10ХМФТ, Св-08ХГСМА, Св-08Х Н2М и Св-08Х Н2ГМТА, допускается увеличение содержания азота на 0,005% сверх норм, указанных в таблице. Для проволоки марок Св-10ХМФТ, Св-08ХГСМА, Св-08Х Н2М и Св-08Х Н2ГМТА, а с 01.01.1981 г. и для проволоки других марок 4, 5 и 6-й групп указанное увеличение содержания азота может быть допущено с согласия потребителя.

4. При поставке проволоки 7-й группы с регламентированным содержанием ферритной фазы требование по ограничению содержания азота не является обязательным.

По соглашению сторон проволока должна изготовляться из стали с суженными пределами содержания химических элементов по сравнению с указанными в табл. 2, а также с ограничением содержания химических элементов, не указанных в табл. 2 и в изложенных выше требованиях. По соглашению сторон разрешается устанавливать другие допустимые значения остаточного содержания химических элементов по сравнению с указанными выше.

Проволоку с неомедненной поверхностью поставляют свернутой в мотки. Размеры и масса мотков должны соответствовать указанным в табл. 5.

Проволоку с омедненной поверхностью поставляют в мотках прямоугольного сечения, размеры которых должны соответствовать указанным в табл. 6. Для проволок диаметром 1,6—3,0 мм требуемые размеры мотков оговаривают в заказе. По соглашению сторон проволоку с неомедненной поверхностью также поставляют в мотках прямоугольного сечения.

По соглашению сторон проволоку поставляют намотанной на катушки или в кассеты, а также в мотках повышенной массы или на крупногабаритных катушках.

5. Размеры и масса мотков проволоки

Диаметр проволоки	Внутренний диаметр витков мотка проволоки	Масса мотка проволоки, кг, не менее		
мм		низкоуглеродистой	легированной	высоколегированной
0,3 и 0,5	150—300	2	2	1,5
0,8	200—350	5	5	3,0
1,0 и 1,2	200—400	20	15	10,0
1,4 и 1,5	300—600	25	15	10,0
1,6 и 2,0	300—600	30	20	15,0
2,5 и 3,0	400—600			
4,0—10,0	500—750	40	30	20,0
12,0	600—800			

Примечание. Допускается поставка мотков массой, уменьшенной до 50% от указанной в табл. 5, в объеме не более 10% общей массы проволоки в партии.

6. Размеры мотков прямоугольного сечения, мм

Диаметр проволоки	Наружный диаметр		Внутренний диаметр		Высота	
	Номинальный	Предельные отклонения	Номинальный	Предельные отклонения	Номинальная	Предельные отклонения
0,8—1,6	175	$^{+10}_{-5}$	100	$^{+6}_{-2}$	50	±4
1,6—2,0	250	$^{+15}_{-5}$	175	$^{+8}_{-4}$	85	$^{+4}_{-6}$
2,0—3,0	320	$^{+25}_{-5}$	220	$^{+8}_{-4}$		
3,0			260	$^{+10}_{-4}$	90	$^{+4}_{-6}$
1,6—5,0	600	$^{+50}_{-10}$	400	$^{+20}_{-15}$		$^{+8}_{-10}$

Проволока в мотках (катушках, кассетах) должна состоять из одного отрезка, свернутого неперепутанными рядами и плотно увязанного таким образом, чтобы исключить возможность распушивания или разматывания мотка. Концы проволоки должны быть легко находимы. Допускается контактная стыковая сварка отдельных кусков проволоки одной плавки; при этом поверхность проволоки в зоне сварного соединения должна соответствовать требованиям ГОСТ 2246—70.

Временное сопротивление разрыву легированной и высоколегированной проволоки должно соответствовать нормам, указанным в табл. 7.

Допускается повышение верхнего предела временного сопротивления разрыву (независимо от назначения проволоки):

до 110 кгс/мм² для проволоки диаметром свыше 2 мм марок Св-06Х20Н11М3ТБ, Св-07Х25Н12Г2Т, Св-06Х25Н12ТЮ и Св-08Х25Н13БТЮ;

7. Временное сопротивление разрыву проволоки, кгс/мм²

Диаметр проволоки, мм	Проволока	
	для сварки (наплавки)	для изготовления электродов
0,3—0,5	90—140	—
0,8—1,5	90—135	—
1,6	90—130	70—100
2,0	80—120	70—100
Св. 2,0	70—105	65—95

Примечания: 1. Колебания временного сопротивления разрыву в одном мотке проволоки диаметром более 1,4 мм не должны превышать 10 кгс/мм².

2. Легированную и высоколегированную проволоку подвергают дополнительной термической обработке. При обеспечении заданных пределов временного сопротивления разрыву дополнительную термическую обработку проволоки допускается не производить.

до 115 кгс/мм² для проволоки диаметром свыше 2 мм марок Св-10Х16Н25АМ6, Св-09Х16Н25М6АФ, Св-01Х23Н28М3Д3Т и Св-06Х15Н60М15;

до 135 кгс/мм² для проволоки диаметром 2 мм марок Св-08Х20Н9Г7Т, Св-08Х21Н10Г6, Св-10Х16Н25АМ6 и Св-09Х16Н25М6АФ;

до 145 кгс/мм² для проволоки диаметром менее 2 мм марок Св-08Х20Н9Г7Т, Св-08Х21Н10Г6, Св-10Х16Н25АМ6 и Св-09Х16Н25М6АФ;

до 180 кгс/мм² для проволоки диаметром 2 мм и менее марок Св-01Х23Н28М3Д3Т и Св-06Х15Н60М15.

Поверхность проволоки должна быть чистой и гладкой, без трещин, расслоений, плен, закатов, раковин, забоин, окалины, ржавчины, масла и других загрязнений. На поверхности проволоки допускаются риски (в том числе затянутые), царапины, местная рябизна и отдельные вмятины. Глубина указанных пороков не должна превышать предельного отклонения по диаметру проволоки.

По требованию потребителя проволока поставляется с улучшенной поверхностью. В этом случае на поверхности проволоки допускаются мелкие волочильные риски, царапины, следы шлифования, местная рябизна и отдельные вмятины, при глубине каждого из указанных пороков не более 1/4 предельного отклонения по диаметру.

На поверхности низкоуглеродистой и легированной проволоки не допускается наличие технологических смазок, за исключением следов мыльной смазки без графита и серы.

Проволока марок Св-08ГС, Св-08Г2С, Св-08ГСМТ, Св-08ХГ2С, Св-08ХГСМА, Св-10ХГ2СМА, Св-08ХГСМФА и Св-08Х3Г2СМ должна поставляться или с омедненной поверхностью, или с неомедненной поверхностью, но с удалением следов мыльной смазки. При этом вид поверхности поставляемой проволоки устанавливается изготовителем, если в заказе не оговорена поставка проволоки с омедненной поверхностью. С согласия потребителя допускается поставка неомедненной проволоки перечисленных марок со следами мыльной смазки (без графита и серы) на поверхности.

С согласия потребителя проволоку марок Св-18ХГС и Св-18ХМА для предохранения от коррозии разрешается покрывать сплошным слоем нейтральной смазки, хорошо растворимой в бензине.

Высоколегированная проволока должна поставляться в травленом и отбеленном состоянии или после термической обработки в инертной атмосфере со светлой, светло-матовой или серой поверхностью, без всяких следов смазки.

Проволока должна быть принята техническим контролем предприятия-изготовителя. Изготовитель должен гарантировать соответствие поставляемой проволоки требованиям ГОСТ 2246—70.

57243
Биб...
ВИФ...

8. Химический состав проволоки из алюминия и алюминиевых сплавов, %

Марки сплавов	Основные компоненты								Примеси, не более						
	Al	Mg	Mn	Fe	Si	Ti	Be	Zr	Fe	Si	Zn	Cu	Mg	Прочие	Сумма
СвА97	⩾99,97					—			0,015	0,015	—	0,005	—	0,01	0,03
СвА85Т	Остальное		—	—	—	0,20—0,50			0,04	0,04	0,02	0,01	0,01	—	0,08
СвА5	⩾99,50	—		0,20—0,35	0,10—0,25		—				—	0,015	—	0,05	0,50
СвАМц			1,0—1,5	0,30—0,50	0,20—0,40	—			—	—	0,10	0,20	0,05		1,35
СвАМг3		3,2—3,8	0,3—0,6		0,05—0,80			—	0,50						0,85
СвАМг4		4,0—4,8			0,05—0,25 Cr	0,05—0,15					0,20				1,15
СвАМг5		4,8—5,8	0,5—0,8			0,10—0,20	0,0020—0,0050		0,40	0,40		0,05		0,10	1,40
Св1557		4,5—5,5	0,2—0,6			0,07—0,15 Cr		0,20—0,35	0,30	0,15	—				0,60
СвАМг6	Остальное	5,8—6,8	0,5—0,8		—	0,10—0,20		—	0,40	0,40	0,20	0,10	—		1,20
СвАМг63				—				0,15—0,35	0,05	0,05	0,05	0,05		0,001	0,15
СвАМг61		5,5—6,5	0,8—1,1			—	0,0001—0,0003	0,002—0,12	0,40	0,40	0,20				1,15
СвАК5					4,50—6,00	0,10—0,20					Zn и Sn 0,10	0,20		0,10	1,00
СвАК10		—	—		7,00—10,00	—	—	—	0,60	—	0,20	0,10	0,10		1,10
Св1201		6,0—6,8 Cu	0,2—0,4		0,05—0,15 V	0,10—0,20	0,0001—0,0008	0,10—0,25	0,15	0,08	0,05	—	0,02	0,001	0,30

Примечания: 1. Для проволоки всех марок, кроме СвАМг3, СвАК5 и СвАК10, соотношение содержания железа и кремния должно быть более единицы.

2. Содержание бериллия устанавливается по расчету шихты.

3. Для проволоки марок СвАМг3, СвАК10 допускается содержание остаточного титана до 0,15%.

4. По заказу потребителя проволока из сплава марки СвАМг6 изготовляется с содержанием водорода не более 0,4 см³ в 100 г металла.

5. В графу «Прочие примеси» включены примеси, пределы содержания которых не указаны в таблице. Содержание прочих примесей не определяется, а гарантируется предприятием-изготовителем.

6. По заказу потребителя содержание железа в сплаве марки СвАК5 должно быть не более 0,3%.

7. Проволока марки СвАК10 изготовляется прессованной.

Проволока поставляется партиями. Каждая партия должна состоять из проволоки одной марки, одной плавки, одного диаметра, одного назначения и одного вида поверхности.

Стальная сварочная проволока, применяемая в сравнительно небольших количествах, изготовляется по техническим условиям, разработанным, согласованным и утвержденным в установленном порядке. Число марок проволоки, поставляемой по указанным техническим условиям, достигает нескольких сотен. Как правило, в технических условиях регламентируются только химический состав сварочной проволоки и некоторые специальные технические требования, а общие технические требования, методы испытаний, маркировка, упаковка, транспортирование и хранение устанавливаются по ГОСТ 2246—70, который является основным нормативно-техническим документом на стальную сварочную проволоку.

СВАРОЧНАЯ ПРОВОЛОКА ИЗ АЛЮМИНИЯ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

При сварке плавлением алюминия и его сплавов в основном используют тянутую и прессованную сварочную проволоку из алюминия и алюминиевых сплавов по ГОСТ 7871—75, который предусматривает изготовление проволоки четырнадцати марок. Проволоку изготовляют из алюминия и алюминиевых сплавов, химический состав которых в зависимости от их марки приведен в табл. 8.

Диаметры проволоки и их предельные отклонения должны соответствовать указанным в табл. 9.

9. Диаметры проволоки и их предельные отклонения, мм

Диаметр проволоки	Предельные отклонения по диаметру проволоки		Диаметр проволоки	Предельные отклонения по диаметру проволоки	
	тянутой	прессованной		тянутой	прессованной
0,80			3,55		—
0,90			4,00		
1,00					
1,12	—0,060		4,50	—0,096	
1,25			5,00		
1,40			5,60		—0,30
1,60		—	6,30		
1,80			7,10		
2,00			8,00	—0,116	
2,24			9,00		—0,36
2,50				—0,140	
2,80	—0,080		10,00		
3,15			11,20	—	—0,70
			12,50		

В условном обозначении проволоки указывают диаметр проволоки, марку сплава и обозначение стандарта.

Пример условного обозначения сварочной проволоки диаметром 2 мм из алюминиевого сплава марки АМц:

2-СвАМц ГОСТ 7871—75

Овальность проволоки не должна превышать предельных отклонений по диаметру.

Поверхность проволоки диаметром 4 мм и менее подвергают химической обработке. После обработки проволока должна иметь блестящую поверхность с параметрами шероховатости $Ra \leqslant 2{,}5$ мкм по ГОСТ 2789—73.

Проволоку с химически обработанной поверхностью наматывают на катушки механическим способом рядами без перегибов и зазоров.

Размеры катушек и длина намотанной проволоки должны соответствовать приведенным в табл. 10.

10. Размеры катушки и длина намотанной проволоки

Диаметр проволоки, мм	Размеры катушки, мм				Длина намотанной на катушку проволоки, м		Диаметр проволоки, мм	Размеры катушки, мм				Длина намотанной на катушку проволоки, м	
	Наружный диаметр щек	Наружный диаметр цилиндра	Внутренний диаметр цилиндра	Высота	Номинальная	Предельные отклонения		Наружный диаметр щек	Наружный диаметр цилиндра	Внутренний диаметр цилиндра	Высота	Номинальная	Предельные отклонения
0,80 0,90 1,00 1,12	100	50	16,5	45	400 250 180 170	±10	2,00 2,24 2,50 2,80	300	200	51,5	100	900 600 450 370	±10
1,25 1,40 1,60 1,80 2,00	200	100	51,5	55	500 450 340 300 290	±10	3,15 3,55 4,00	430	300	51,5	100	890 670 520	±10

Концы проволоки должны выходить на боковую поверхность щек катушки и должны быть легко находимы.

Внешний ряд намотанной проволоки должен быть на расстоянии 5—7 мм от наружного края щек катушек диаметром 100 мм и на расстоянии 10—12 мм от наружного края щек катушек диаметром 200, 300 и 430 мм.

Проволоку из сплавов марок СвА97, СвА85Т, СвА5 и СвАМц наматывают на катушки в нагартованном состоянии с временным сопротивлением разрыву не менее 10 кгс/мм², а проволоку из сплавов марок СвАМг3, СвАМг5, Св1557, СвАМг6, СвАМг63, СвАМг61, СвАК5, СвАК10 и Св1201 по заказу потребителя наматывают в отожженном или нагартованном состоянии.

Проволока на катушках должна состоять из одного отрезка. Допускается стыковая сварка проволоки одной плавки; при этом проволока в местах сварки должна удовлетворять требованиям стандарта.

Проволоку диаметром свыше 4 мм поставляют в мотках или пучках длиной не менее 1 м, без химической обработки поверхности. Внутренний диаметр мотка должен быть не более 750 мм.

Проволока в мотках должна иметь чистую поверхность, без плен, трещин, закатов, вмятин, заусенцев, расслоений и резких перегибов.

По заказу потребителя в мотках без химической обработки поверхности поставляют и проволоку диаметром до 4 мм.

Не допускаются местные дефекты поверхности проволоки, глубина которых (при их удалении) превышает предельные отклонения по диаметру.

На поверхности проволоки допускаются белые и темные пятна без шероховатостей, а также цвета побежалости.

Проволока поставляется партиями. Каждая партия должна состоять из проволоки одного диаметра, сплава одной марки, одной плавки и одного состояния. Масса партии не ограничивается.

Катушки с проволокой помещают в полиэтиленовый мешок вместе с контрольным пакетом порошка обезвоженного селикагеля-индикатора и герметизируют при относительной влажности окружающего воздуха менее 20% в течение 30 мин после химической обработки. Герметичность упаковки оценивают визуально по цвету селикагеля-индикатора. Герметичность следует считать нарушенной, если порошок селикагеля-индикатора имеет розовый цвет.

Герметизированные полиэтиленовые мешки с катушками упаковывают в картонные, пластмассовые или деревянные ящики.

Сварочная проволока из других алюминиевых сплавов изготовляется по техническим условиям, разработанным, согласованным и утвержденным в установленном порядке.

СВАРОЧНЫЕ ПРОВОЛОКА И ПРУТКИ ИЗ МЕДИ И СПЛАВОВ НА МЕДНОЙ ОСНОВЕ

При сварке, наплавке и пайке меди и ее сплавов используют сварочные проволоку и прутки из меди и сплавов на медной основе по ГОСТ 16130—72.

Сварочную проволоку по указанному стандарту изготовляют из меди и ее сплавов семнадцати марок: М1; МСр1; МНЖ5—1; МНЖКТ5—1—0,2—0,2; БрКМц3—1; БрОЦ4—3; БрАМц9—2; БрОФ6,5—0,15; БрАЖМц10—3—1,5; БрХ0,7; БрХНТ; БрНЦр; БрНЦрТ; Л63; ЛО60—1; ЛК62—0,5; ЛКБО62—0,2—0,04—0,5.

11. Диаметры проволоки и их предельные отклонения, мм

Номинальный диаметр	Предельные отклонения для проволоки марок: М1; БрКМц3—1; БрОЦ4—3; Л63	БрОФ6,5—0,15	БрАЖМц10—3—1,5	ЛО60—1	МНЖКТ5—1—0,2—0,2	МНЖ5—1	ЛКБО62—0,2—0,04—0,5; МСр1; ЛК62—0,5	БрАМц9—2	БрХНТ; БрНЦр; БрНЦрТ	БрХ0,7
0,8	—	—		—	−0,07	—	—	—	—	—
1,0										
1,2	−0,12	−0,12	—	−0,12	−0,12		−0,12		−0,06	−0,06
1,4										
1,6										
1,8										
2,0										
2,5								−0,12		
3,0						−0,12				
4,0		−0,16		−0,16	−0,16	−0,16	−0,16	−0,16	−0,08	−0,08
5,0	−0,16									
6,0		—	−0,16		—	—			—	
8,0	−0,20		−0,20	−0,20			—	−0,20		—

Сварочные прутки изготовляют из меди и ее сплавов двенадцати марок: М1р; М3р; БрОФ6,5—0,15; БрОЦ4—3; БрАМц9—2; ЛО60—1; ЛК62—0,5; Л63; ЛМц58—2; ЛЖМц59—1—1; ЛОК59—1—0,3; ЛКБО62—0,2—0,04—0,5.

Диаметры проволоки и их предельные отклонения должны соответствовать указанным в табл. 11. Диаметры прутков и их предельные отклонения должны соответствовать указанным в табл. 12.

12. Диаметры прутков и их предельные отклонения, мм

Номинальный диаметр	Предельные отклонения для прутков марок	
	М1р; М3р; ЛО60—1; ЛК62—0,5; Л63; БрОФ6,5—0,15; БрОЦ4—3; БрАМц9—2; ЛМц58—2; ЛЖМц59—1—1; ЛКБО62—0,2—0,04—0,5	ЛОК59—1—0,3
6,0 8,0	±0,5	—1,0

Овальность проволоки и прутков не должна превышать предельных отклонений по диаметру.

Прутки изготовляют:

немерной длины от 1 до 5 м;

мерной длины или длины, кратной мерной, оговоренной в заказе, в пределах немерной; прутки мерной длины поставляют по требованию потребителя.

В партии прутков немерной длины допускаются укороченные до 0,5 м прутки в количестве не более 15% массы сдаваемой партии.

Прутки марки ЛОК59—1—0,3 поставляются в бухтах. Длина прутка в бухте должна быть не менее 10 м. Допускается поставлять в бухтах прутки остальных марок длиной не менее 3 м. Химический состав проволоки и прутков из сплавов марок МСр1; МНЖКТ5—1—0,2—0,2; БрХ0,7; БрХНТ; БрНЦр; БрНЦрТ; ЛК62—0,5; ЛКБО62—0,2—0,04—0,5 и ЛОК59—1—0,3 должен соответствовать указанному в табл. 13 и 14.

Химический состав проволоки и прутков из меди марок М1; М1р и М3р, бронз марок БрКМц3—1; БрАМц9—2; БрАЖМц10—3—1,5; БрОЦ4—3 и БрОФ6,5—0,15, латуней марок Л63; ЛМц58—2; ЛО60—1 и ЛЖМц59—1—1, а также из сплава марки МНЖ5—1 должен удовлетворять требованиям ГОСТ 859—66, ГОСТ 493—54, ГОСТ 18175—72, ГОСТ 5017—74, ГОСТ 15527—70 и ГОСТ 17217—71 соответственно.

По требованию потребителя проволока и прутки марки БрОФ6,5—0,15 должны изготовляться с содержанием фосфора 0,3—0,4%, а проволока марки ЛК62—0,5 — с содержанием кремния 0,06—0,20%.

Поверхность проволоки и прутков должна быть чистой и гладкой, без трещин и расслоений. На поверхности проволоки и прутков не допускаются дефекты (плены, закаты, раковины, царапины, уколы, вмятины и др.), глубина которых (при их удалении) превышает половину предельных отклонений по диаметру. Покраснение поверхности после травления и цвета побежалости браковочным признаком не являются.

Проволока должна поставляться мягкой (М), полутвердой (Пт) и твердой (Т) в соответствии с табл. 15.

Проволока марок БрОЦ4—3, БрКМц—3—1 полутвердая поставляется по соглашению сторон.

Прутки должны поставляться мягкими или твердыми.

Состояние поставляемой проволоки и прутков оговаривается в заказе.

Временное сопротивление разрыву проволоки марки М1 (мягкой и твердой) и марки МНЖКТ5—1—0,2—0,2 (полутвердой) должно соответствовать нормам, указанным в табл. 16.

Число перегибов проволоки марки М1 (твердой) должно быть не менее: семи для проволоки диаметром 1,2—2,5 мм; пяти для проволоки диаметром 3,0 мм; четырех для проволоки диаметром 4,0—6,0 мм.

13. Химический состав проволоки и прутков, %

Марки сплавов	Основные компоненты								
	Cu	Ni+Co	Mn	Si	Ti	Cr	Zr	Zn	Прочие элементы
МСр1	98,5—99,0	—	—	—	—	—	—	Остальное	0,8—1,2 Ag
МНЖКТ5—1—0,2—0,2	Остальное	5,0—6,5	0,3—0,8	0,15—0,30	0,10—0,30	—	—		1,0—1,4 Fe
БрХ0,7		—	—	—	—	0,40—1,00	—	—	—
БрХНТ		0,5—0,8 Ni			0,05—0,15	0,15—0,35			
БрНЦр		0,3—0,6 Ni			—	—	0,04—0,08		
БрНЦрТ		0,5—0,8 Ni			0,10—0,20	—	1,40—1,70		
ЛК62—0,5	60,5—63,5	—	—	0,30—0,70	—	—	—	Остальное	0,3—0,7 Sn 0,03—0,10 B
ЛКБО62—0,2—0,04—0,5				0,10—0,30					
ЛОК59—1—0,3	58,0—60,0			0,20—0,40					0,7—1,1 Sn

14. Химический состав проволоки и прутков, %

Марки сплавов	Примеси, не более									
	Pb	Fe	Sb	Bi	P	Zn	Si	Mg	Прочие элементы	Всего
МСр1	0,010	0,05	0,005	0,002	—	—	—	—	0,01 As; 0,07 O; 0,05 Sn; 0,01 S	0,3
МНЖКТ5—1—0,2—0,2	0,005	—	—	—	0,005	0,500	0,03	0,002	0,03C	0,7
БрХ0,7		0,06				0,007			—	0,3
БрХНТ						0,025				0,2
БрНЦр						0,005				0,2
БрНЦрТ		0,05				—				0,1
ЛК62—0,5	0,080	0,15	0,005	0,002	0,010	—	—	—	—	0,5
ЛКБО62—0,2—0,04—0,5			—	—	—				0,05 Al	0,5
ЛОК59—1—0,3	0,100		0,010	0,003	0,010				0,01 As	0,3

Прутки при испытании на загиб должны выдержать в холодном состоянии без появления надрывов и отслоений загиб на 90° вокруг оправки с радиусом закругления, равным диаметру прутка.

15. Состояние поставляемой проволоки

Проволока	Марки
Мягкая (отожженная)	М1; МСр1; МНЖ5—1; МНЖКТ5—1—0,2—0,2 (диаметром от 2 до 5 мм); Л63; ЛК62—0,5; ЛКБО62—0,2—0,04—0,5
Полутвердая	МНЖКТ5—1—0,2—0,2 (диаметром от 0,8 до 1,8 мм); БрАМц9—2; БрОЦ4—3; БрКМц3—1; Л63
Твердая	М1; БрКМц3—1; БрОЦ4—3; БрХ0,7; БрХНТ; БрНЦр; БрНЦрТ; БрОФ6,5—0,15; БрАЖМц10—3—1,5; Л63; ЛО60—1

16. Временное сопротивление разрыву проволоки. кгс/мм², на менее

Диаметр проволоки, мм	Проволока марки		
	М1		МНЖКТ5—1—0,2—0,2
	мягкая	твердая	полутвердая
0,8—1,0	—	—	50—70
1,2—1,8	21	39	
2,0—2,5			
3,0		37	—
4,0—6,0		36	
7,0—8,0			

17. Размеры и масса мотков

Диаметр проволоки, мм	Внутренний диаметр витков мотка проволоки, мм	Масса мотка проволоки, кг, не менее
0,8 1,0—1,4 1,6—2,0	150—250 200—400 250—600	5
2,5—4,0	500—700	10
5,0—8,0		20

В изломе прутки не должны иметь посторонних включений, расслоений и пустот.

С твердой латунной проволоки и прутков должны быть сняты остаточные напряжения низкотемпературным отжигом или механическим путем. Прутки должны быть выправлены. Кривизна прутков не должна превышать 4 мм на 1 м длины. Прутки должны быть ровно обрезаны. Допускается поставлять прутки с обрубленными концами.

Проволока должна поставляться свернутой в мотки. Размеры и масса мотков должны соответствовать указанным в табл. 17.

Допускается поставка мотков проволоки пониженной массы в количестве:

10% партии с массой мотка не менее 3 кг для проволоки диаметром до 2 мм включительно;

20% партии с массой мотка не менее 5 кг для проволоки диаметром свыше 2 мм.

Проволока должна быть свернута в мотки правильными, неперепутанными рядами, без резких изгибов.

По соглашению сторон проволока диаметром 0,8—2,0 мм должна поставляться намотанной на катушки.

По соглашению сторон допускается поставка проволоки диаметром более 2 мм на крупногабаритных катушках или в мотках повышенной массы.

Проволока должна быть намотана на катушки без ослабления и перепутывания витков.

В условном обозначении проволоки и прутков указывают марку сплава, состояние поставки, диаметр, а также обозначение стандарта.

Примеры условных обозначений. Проволока диаметром 2 мм, марки ЛК62—0,5, мягкая:

Проволока ЛК62—0,5—М—2 ГОСТ 16130—72

Пруток диаметром 6 мм, марки ЛКБО62—0,2—0,04—0,5, твердый:

Пруток ЛКБО62—0,2—0,04—0,5—Т—6 ГОСТ 16130—72

Проволока и прутки поставляются партиями. Каждая партия должна состоять из проволоки или прутков одной марки, одного диаметра и одного состояния поставки. Масса партии не должна превышать 1 000 кг.

ГОСТ 16130—72 содержит рекомендуемое приложение (табл. 18), в котором указано назначение проволоки и прутков из меди и сплавов на медной основе.

Сварочная проволока из меди и ее сплавов других марок изготовляется по техническим условиям, разработанным, согласованным и утвержденным в установленном порядке.

18. Назначение проволоки и прутков

Марка сплава	Назначение
М1	Для автоматической сварки под флюсом изделий из меди, изготовления электродов для сварки меди и чугуна, газовой сварки неответственных конструкций из меди
М1р, М3р	Для газовой сварки конструкций общего назначения из меди
МСр1	Для газовой сварки ответственных и электротехнических конструкций из меди
МНЖ5—1	Для изготовления электродов для сварки медно-никелевого сплава, медно-никелевого сплава с латунью и алюминиево-марганцевой бронзой
МНЖКТ5—1—0,2—0,2	Для ручной, полуавтоматической и автоматической сварки в защитных газах медно-никелевого сплава или меди с бронзой, латунью и сталью, а также для наплавки на сталь
БрКМц3—1	Для ручной сварки в защитных газах нежестких конструкций из меди, автоматической сварки меди под флюсом и изготовления электродов для сварки меди
БрОЦ4—3	Для ручной сварки в защитных газах меди, автоматической и полуавтоматической сварки под флюсом меди и латуни и изготовления электродов для сварки меди
БрАМц9—2	Для ручной сварки в защитных газах алюминиево-марганцевой бронзы, мышьяковистой латуни, меди и медно-никелевого сплава с алюминиево-марганцевой бронзой; для ручной, полуавтоматической и автоматической наплавки в защитных газах на сталь; для полуавтоматической сварки в защитных газах алюминиево-марганцево-железистой и марганцево-железистой латуни
БрАЖМц10—3—1,5	Для изготовления электродов для сварки алюминиево-железистой бронзы
БрОФ6,5—0,15	Для ручной сварки в защитных газах оловянно-фосфористой бронзы и оловянных бронз
БрХ0,7; БрХНТ; БрНЦр; БрНЦрТ	Для ручной аргонодуговой сварки бронз
БрХ0,7	Для автоматической сварки хромистой бронзы под флюсом
Л63	Для газофлюсовой сварки латуни
ЛК62—0,5	Для газовой сварки латуни
ЛО60—1	Для газофлюсовой сварки латуни, легированной оловом
ЛКБО62—0,2—0,04—0,5	Для газовой сварки латуни и пайки меди без применения флюса
ЛМц58—2; ЛЖМц59—1—1; ЛОК59—1—0,3	Для сварки латуни, пайки меди и меди с латунью

НАПЛАВОЧНАЯ СТАЛЬНАЯ ПРОВОЛОКА

При механизированной дуговой наплавке стальных деталей в основном используют горячекатаную и холоднотянутую стальную наплавочную проволоку по ГОСТ 10543—75, который предусматривает изготовление углеродистой проволоки девяти марок, легированной проволоки одиннадцати марок и высоколегированной проволоки десяти марок.

Проволока изготовляется из стали, химический состав которой в зависимости от марки проволоки приведен в табл 19.

Номинальные диаметры проволоки и предельные отклонения по ним должны соответствовать указанным в табл. 20.

Овальность проволоки не должна превышать предельных отклонений по диаметру.

В условном обозначении наплавочной проволоки указывают ее диаметр и марку, а также обозначение стандарта.

Пример условного обозначения проволоки из стали марки 30ХГСА диаметром 3 мм:

Проволока 3Нп—30ХГСА ГОСТ 10543—75

Допускается поставлять проволоку из стали с отклонениями по химическому составу от норм, указанных в табл. 19, при условии соблюдения остальных требований стандарта. Допускаемые отклонения по химическому составу должны соответствовать указанным в табл. 21.

Проволока должна поставляться свернутой в мотки. Внутренние диаметры и масса мотков проволоки должны соответствовать указанным в табл. 22.

По соглашению изготовителя с потребителем допускается поставлять проволоку на крупногабаритных катушках.

По соглашению изготовителя с потребителем проволока поставляется в мотках прямоугольного сечения, размеры которых должны соответствовать требованиям ГОСТ 2246—70, а также намотанной на катушки или в кассеты.

Проволока в мотках, катушках и кассетах должна состоять из одного отрезка, свернутого (намотанного) неперепутанными рядами так, чтобы исключить ее распушивание или разматывание. Концы проволоки должны быть легко находимы. Допускается стыковая сварка проволоки; при этом проволока в местах сварки должна соответствовать требованиям стандарта.

Проволока диаметром свыше 2 мм должна выдерживать испытание на изгиб в холодном состоянии на 180° вокруг цилиндрического сердечника диаметром, равным пяти диаметрам испытуемой проволоки.

Холоднотянутая проволока поставляется в нагартованном состоянии или термически обработанной.

Поверхность проволоки должна быть чистой, гладкой и светлой (без дополнительной обработки после деформирования) либо оксидированной (термически обработанной) с цветами побежалости, без окалины (за исключением горячекатаной проволоки), ржавчины, плен, надрывов и усов. Следы мыльной смазки (без графита, серы и других примесей) допускаются на поверхности проволоки из стали всех марок, кроме высоколегированной.

По соглашению изготовителя с потребителем для предохранения от коррозии разрешается покрывать проволоку сплошным слоем чистой нейтральной смазки, хорошо растворимой в бензине.

Проволока поставляется партиями. Каждая партия должна состоять из проволоки одной марки, одной плавки и одного диаметра, оформленной одним документом о качестве.

ГОСТ 10543—75 содержит справочное приложение (табл. 23), в котором приведены твердость и примерное назначение металла, наплавленного проволокой конкретных марок.

Стальная наплавочная проволока других марок изготовляется по техническим условиям, разработанным, согласованным и утвержденным в установленном порядке.

19. Химический состав стали проволоки, %

	Марка проволоки	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	W	S не более	P не более
Углеродистая	Нп—25	0,22—0,30	0,50—0,80	0,17—0,37	⩽ 0,25	⩽ 0,30	—	—	—	0,040	0,040
	Нп—30	0,27—0,35									
	Нп—35	0,32—0,40									
	Нп—40	0,35—0,45									
	Нп—45	0,42—0,50									
	Нп—50	0,45—0,55									
	Нп—65	0,60—0,70									
	Нп—80	0,75—0,85									
	Нп—85	0,82—0,90									
Легированная	Нп—40Г	0,35—0,45	0,70—1,00	0,17—0,37	⩽ 0,30	⩽ 0,30	—	—	—	0,040	0,040
	Нп—50Г	0,45—0,56									
	Нп—65Г	0,60—0,70	0,90—1,20								
	Нп—30ХГСА	0,27—0,35	0,80—1,10	0,90—1,20	0,80—1,10		0,30—0,50	0,10—0,20	—	0,030	0,040
	Нп—30Х5		0,40—0,70	0,20—0,50	4,00—6,00		0,80—1,20	—		0,040	
	Нп—40Х3Г2МФ	0,35—0,45	1,30—1,80	0,40—0,70	3,30—3,80		0,15—0,30	0,10—0,20	—	0,030	0,030
	Нп—40Х2Г2М	0,35—0,43	1,80—2,30		1,80—2,30		—	—		0,040	0,040
	Нп—55ХНМ	0,50—0,60	0,50—0,80	⩽ 0,35	0,50—0,80	1,40—1,80	1,20—1,60	0,35—0,55	—	0,030	0,030
	Нп—50ХФА	0,46—0,54		0,17—0,37	0,80—1,10	⩽ 0,40	—	—			
	Нп—50Х6ФМС	0,45—0,55	0,30—0,60	0,80—1,20	5,50—6,50	⩽ 0,35					
	Нп—105Х	0,95—1,10	0,15—0,40	0,15—0,35	1,30—1,65						
Высоколегированная	Нп—20Х14	0,16—0,25	⩽ 0,80	⩽ 0,80	13,00—15,00	⩽ 0,60	—	—	—	0,030	0,035
	Нп—30Х13	0,25—0,35			12,00—14,00						
	Нп—30Х10Г10Т	0,25—0,35	10,00—12,00	⩽ 0,35	10,00—12,00		0,15—0,30 Ti	—	—	0,030	0,035
	Нп—40Х13	0,35—0,45	⩽ 0,80	⩽ 0,80	12,00—14,00		—				
	Нп—45Х4В3Ф	0,40—0,50	0,80—1,20	0,70—1,00	3,60—4,60		0,05—0,90 Ti	0,30—0,50	—	0,040	0,040
	Нп—45Х2В8Т		1,00—1,40		2,20—3,00						
	Нп—60Х3В10Ф	0,55—0,65	1,30—1,80	0,40—0,70	2,60—3,60	⩽ 0,35	—	—	—	0,030	0,035
	Нп—Г13А	1,00—1,20	12,50—14,50	⩽ 0,40	⩽ 0,60	⩽ 0,60	—	—	—	0,025	0,035
	Нп—Х15Н60	⩽ 0,15	⩽ 1,50	⩽ 1,00	15,00—18,00	55,00—61,00				0,015	0,020
	Нп—Х20Н80Т	⩽ 0,12	⩽ 0,70	⩽ 0,80	19,00—23,00	Основа	0,15—0,40 Ti	—	—		

Примечания: 1. Условные обозначения марок проволоки состоят из индекса Нп (наплавочная) и следующих за ним цифр и букв. Цифры, следующие за индексом Нп, указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Цифры, следующие за буквенными обозначениями химических элементов, указывают среднее содержание элемента в процентах. После буквенного обозначения элементов, содержащихся в небольших количествах, цифры не проставлены.

2. Химические элементы, содержащиеся в металле проволок, обозначены: В — вольфрам, Г — марганец, М — молибден, Н — никель, С — кремний, Т — титан, Ф — ванадий, Х — хром.

20. Диаметры проволоки и их предельные отклонения, мм

Номинальный диаметр	Предельные отклонения
0,3	—0,05
1,5	—0,06
0,8	—0,07
1,0	—0,09
1,2	
1,4	
1,6	—0,12
1,8	
2,0	
2,5	
3,0	
4,0	—0,16
5,0	
6,0	
6,5	±0,5
8,0	

21. Допускаемые отклонения по химическому составу

Элемент	Предельное содержание элементов	Допускаемые отклонения
	%	
Углерод	По табл. 19	±0,02
Марганец		±0,05
Кремний		
Хром	До 1,1	+0,10
	Св. 1,1 до 7,0	±0,25
	» 7,0	
Титан	По табл. 19	±0,02
Ванадий		
Вольфрам		±0,10
Молибден		

22. Размеры и масса мотков проволоки

Диаметр проволоки	Внутренний диаметр мотка	Масса мотка проволоки из стали, кг, не менее		
мм		углеродистой	легированной	высоколегированной
0,3—0,8	150—300	2	2	1,5
1,0—1,2	250—400	15	10	6
1,4—2,0	250—600	20	15	8
2,5—3,0	400—700	30	20	10
4,0—6,0	500—700	30	20	10
6,5—8,0	500—700	30	20	15

Примечание. В партии проволоки допускается до 10% мотков (по массе) с пониженной массой, которая должна составлять не менее половины, указанной в таблице.

23. Твердость и примерное назначение наплавленного металла

Марка проволоки	Ориентировочная твердость наплавленного металла	Наплавляемые изделия
Нп—25 **Нп—30** **Нп—35**	*HB* 160—220	Оси, шпиндели, валы
Нп—40 **Нп—45**	*HB* 170—230	
Нп—50	*HB* 180—240	Натяжные колеса, скаты тележек, опорные ролики
Нп—65	*HB* 220—300	Опорные ролики, оси
Нп—80	*HB* 260—340	Коленчатые валы, крестовины карданов
Нп—40Г	*HB* 180—240	Оси, шпиндели, ролики, валы
Нп—50Г	*HB* 200—270	Натяжные колеса, опорные ролики гусеничных машин
Нп—65Г	*HB* 230—310	Крановые колеса, оси опорных роликов
Нп—30ХГСА	*HB* 220—300	Обжимные прокатные валки, крановые колеса
Нп—30Х5	*HRC* 37—42	Прокатные валки сортопрокатных станов
Нп—40Х3Г2МФ	*HRC* 38—44	Детали, испытывающие удары и абразивный износ
Нп—40Х2Г2М	*HRC* 54—56 после закалки	Детали машин, работающие с динамическими нагрузками (коленчатые валы, поворотные кулаки, оси опорных катков)
Нп—55ХНМ	*HRC* 40—50	Ковочные и вырубные штампы, валки ковочных машин
Нп—50ХФА	*HRC* 43—50	Шлицевые валы, коленчатые валы двигателей внутреннего сгорания
Нп—50Х6ФМС	*HRC* 42—48	Валки трубопрокатных и сортопрокатных станов, обжимные прокатные валки, штампы горячей штамповки
Нп—105Х	*HRC* 32—38	Обрезные штампы холодной штамповки, валы смесителей
Нп—20Х14		Уплотнительные поверхности задвижек для пара и воды
Нп—30Х13	*HRC* 38—45	Плунжеры гидропрессов, шейки коленчатых валов, штампы
Нп—30Х10Г10Т	*HB* 200—220	Лопасти гидротурбин, гребные винты и валы морских судов
Нп—40Х13	*HRC* 45—52	Опорные ролики тракторов и экскаваторов, детали транспортеров
Нп—45Х4В3Ф	*HRC* 38—45	Валки листопрокатных и сортопрокатных станов, штампы горячей штамповки
Нп—45Х2В8Т	*HRC* 40—46	Ножи для резки горячего металла, прессовой инструмент
Нп—60Х3В10Ф	*HRC* 42—50	Валки трубопрокатных и сортопрокатных станов, штампы горячей штамповки
Нп—Г13А	*HB* 220—280	Железнодорожные крестовины, щеки дробилок, зубья ковшей
Нп—Х15Н60	*HB* 180—220	Детали реторт и печей, работающие при высокой температуре
Нп—Х20Н80Т		Выхлопные клапаны автомобильных двигателей

ЧУГУННЫЕ ПРУТКИ ДЛЯ СВАРКИ И НАПЛАВКИ

Чугунные прутки для газовой сварки и наплавки серого чугуна и электродные стержни для дуговой сварки и наплавки чугуна изготовляют по ГОСТ 2671—70.

В зависимости от назначения чугунные прутки подразделяются на следующие марки:

А — для горячей газовой сварки;

Б — для газовой сварки с местным нагревом и для электродных стержней:

НЧ-1 — для низкотемпературной газовой сварки тонкостенных отливок;

НЧ-2 — для низкотемпературной газовой сварки толстостенных отливок;

БЧ и ХЧ — для износостойкой наплавки.

24. Размеры прутков, мм

Диаметр		Длина (предельные отклонения ±15)	Стрела прогиба, не более
Номинальный	Предельные отклонения		
4	±0,6	250	1,5
6	±0,8	350	2,0
8—10		450	3,0
12—16	±1,0		

Размеры прутков всех марок должны соответствовать указанным в табл. 24.

Химический состав прутков должен соответствовать нормам, указанным в табл. 25.

25. Химический состав прутков, %

Марка прутка	Основные компоненты						Примеси, не более	
	C	Si	Mn	S	P	Прочие элементы	Cr	Ni
А	3,0—3,5	3,0—3,4	0,5—0,8	⩽0,08	0,2—0,4	—	0,05	0,3
Б		3,5—4,0			0,3—0,5			
НЧ-1		3,0—3,4			0,2—0,4	0,03—0,06 Ti, 0,4—0,6 Ni		—
НЧ-2		3,5—4,0		⩽0,05				
БЧ	2,5—3,0	1,0—1,5	0,2—0,6		⩽0,1	—	—	
ХЧ		1,2—1,5	0,5—0,8			1,2—2,0 Cr		

В условном обозначении чугунных прутков указывают их диаметр, марку и обозначение стандарта.

Пример условного обозначения чугунного прутка марки НЧ-1 диаметром 12 мм:

Пруток 12 НЧ-1 ГОСТ 2671—70

Овальность прутков не должна превышать предельного отклонения на диаметр.

На поверхности прутков не допускаются формовочная земля, пригар, шлак, ржавчина и другие загрязнения. Прутки не должны иметь видимых дефектов типа наростов, раковин и трещин размером свыше предельного отклонения на диаметр прутка. Внутри прутков не должно быть более одной пустоты и поры диаметром свыше 1 мм на 100 мм длины прутка.

Твердость поверхности наплавленного слоя образца должна соответствовать нормам, указанным в табл. 26.

26. Твердость поверхности наплавленного слоя образца

Марка прутка	*HB*, не более	*HRC*
А и Б	230	—
НЧ-1 и НЧ-2	240	—
БЧ	—	44—46
ХЧ	—	48—52

За партию принимают прутки одной шихтовки и одной плавки. Масса партии не должна превышать 500 кг.

ПОРОШКИ ДЛЯ НАПЛАВКИ

Для дуговой наплавки неплавящимся электродом износостойкого слоя на детали, работающие в условиях интенсивного абразивного изнашивания, используют механические смеси порошков по ГОСТ 11546—75.

В зависимости от химического состава смеси порошков для наплавки разделены на марки С-2М, ФБХ6—2, БХ и КБХ.

Химический состав смесей порошков для наплавки должен соответствовать нормам, указанным в табл. 27.

27. Химический состав смесей порошков, % (основа — железо)

Марка	Легирующие компоненты					Примеси, не более	
	C	Cr	Si	Mn	B	S	P
С-2М	7,0—10,0	24,0—26,0	0,5—3,0	6,0—8,5	—	0,4	0,3
ФБХ-6—2	3,5—5,5	28,0—37,0	1,0—2,5	2,5—5,5	1,3—2,2		
БХ	0,3—1,0	35,0—44,0	0,5—1,0	—	7,0—9,0	—	—
КБХ	4,0—6,0	42,0—52,0	0,5—1,4	—	0,7—0,9		

Гранулометрический состав смесей порошков для наплавки должен соответствовать нормам, указанным в табл. 28.

Влажность смесей порошков для наплавки не должна превышать 0,3%.

Насыпная плотность смесей и твердость наплавленного слоя должны соответствовать нормам, указанным в табл. 29.

Смеси порошков для наплавки принимают партиями. Масса партии смесей порошков для наплавки должна быть не более 2 т. Партия состоит из смеси порошков разового перемешивания, одной марки, оформленной одним документом о качестве.

ГОСТ 11546—75 содержит рекомендуемое приложение (табл. 30), в котором указана область применения смесей порошков различных марок.

28. Гранулометрический состав смесей порошков

Марка	Величина частиц, мм, не более	Остаток на сите, %, не более				Прохождение через сито, %, не менее			
		Номер сеток по ГОСТ 6613—73							
		1,25	1,0	05	045	1,25	1,0	05	045
С-2М ФБХ-6—2 КБХ БХ	1,0	0	5	—	—	100	95	—	—
	0,45	—	—	0	5	—	—	100	95

Кроме смесей порошков по ГОСТ 11546—75 для наплавки и напыления износостойкого слоя на детали, работающие в условиях абразивного изнашивания, коррозии, эррозии, при повышенных температурах или в агрессивных средах, используют порошки из сплавов по ГОСТ 21448—75, которые в зависимости от химического состава подразделяются на восемь марок (типов): ПГ-С27 (тип ПН-У40Х28Н2С2ВМ); ПГ-С1 (тип ПН-У30Х28Н4С4); ПГ-УС25 (тип ПН-У50Х38Н); ПГ-ФБХ-6—2 (тип ПН-У45Х35ГСР); ПГ-АН1 (тип ПН-У25Х30СР); ПГ-СР2 (тип ПН-ХН80С2Р2); ПГ-СР3 (тип ПН-ХН80С3Р3) и ПГ-СР4 (тип ПН-ХН80С4Р4). Основу сплавов для порошков первых пяти марок составляет железо, последних трех марок — никель. Порошки в зависимости от их гранулометрического состава изготовляют четырех классов: крупный (К), средний (С), мелкий (М) и очень мелкий (ОМ). Влажность порошков не должна превышать 0,1%. Порошки упаковывают в банки из тонколистовой стали. Масса брутто банки не более 50 кг.

29. Плотность смесей порошков и твердость наплавленного слоя

Марка	Насыпная плотность, г/см³	*HRC*
	не менее	
С-2М	2,7	54
ФБХ-6—2	2,9	53
БХ	2,4	63
КБХ	3,6	60

30. Область применения смесей порошков

Марка	Применение
С-2М	Для наплавки бил дробильных аппаратов, ножей бульдозеров и грейдеров, ковшей экскаваторов и драг, шнеков кирпичных прессов, лопастей глиномешалок, катков, поддонов и отвалов бегунковых смесителей, коксовыталкивателей и т. п.
ФБХ-6—2	Для наплавки деталей горнодобывающего и торфоперерабатывающего оборудования, работающего в условиях интенсивного абразивного изнашивания с умеренной ударной нагрузкой
БХ	Для наплавки лопастей глиномешалок, деталей кирпичных прессов, пресс-форм для брикетирования угля и торфа, лопастей вентиляционных дымососов, деталей земснарядов, колец дезинтеграторов и т. п.
КБХ	Для наплавки лопастей глиномешалок, деталей кирпичных прессов, пресс-форм для брикетирования угля, зубьев одноковшовых и роторных экскаваторов, ножей бульдозеров и грейдеров, лопастей вентиляционных дымососов, лопаток дробеметов и т. п.

НЕПЛАВЯЩИЕСЯ ЭЛЕКТРОДЫ

В качестве неплавящихся электродов для дуговой резки и сварки используются угольные электроды по ГОСТ 10720—75, а также графитовые и вольфрамовые электроды.

ГОСТ 10720—75 регламентирует изготовление омедненных и неомедненных угольных электродов, применяемых для воздушно-дуговой резки металлов, удаления прибылей и дефектов отливок, удаления прихваток и сварных швов при силе тока до 580 А, для сварки металлов и других работ. В зависимости от назначения и сечения угольных электродов ГОСТ 10720—75 предусматривает изготовление электродов трех марок: ВДК — воздушно-дуговые круглые; ВДП — воздушно-дуговые плоские; СК — сварочные круглые.

Электроды марки ВДК выпускаются с номинальными диаметрами 6, 8, 10 и 12 мм при длине 300 ± 10 мм. Электроды марки ВДП выпускаются номинальным сечением 12 × 5 мм и 18 × 5 мм при длине 350 ± 10 мм. Электроды марки СК выпускаются с номинальными диаметрами 4, 6, 8, 10, 15 и 18 мм при длине 250 ± 10 мм. Длина неомедненной части омедненных угольных электродов всех марок не должна превышать 30 мм. По требованию потребителя допускается изготовление электродов марки СК длиной до 700 ± 35 мм.

Пример условного обозначения воздушно-дугового круглого электрода диаметром 6 мм:

Электрод ВДК 6 ГОСТ 10720—75

воздушно-дугового плоского электрода шириной 12 мм и высотой 5 мм:

Электрод ВДП 12 × 5 ГОСТ 10720—75

Неплавящиеся графитовые электроды, специально предназначенные для дуговой резки и сварки, по государственным стандартам не изготовляются, поэтому в ряде случаев их делают путем разрезки и обтачивания графитизированных электродов по ГОСТ 4426—71.

Неплавящиеся вольфрамовые электроды в виде прутков изготовляют по техническим условиям, разработанным, согласованным и утвержденным в установленном порядке. Различными техническими условиями предусмотрено изготовление вольфрамовых прутков четырех видов, используемых в качестве неплавящихся электродов при дуговой сварке в защитных газах (в основном при аргонодуговой сварке):

из лантанированного вольфрама (с добавкой окиси лантана до 2%);
из иттрированного вольфрама (с добавкой окиси иттрия до 2%);
из торированного вольфрама (с добавкой двуокиси тория до 1,5%);
из вольфрама без специальных добавок.

Наиболее широкое применение находят неплавящиеся электроды из лантанированного и иттрированного вольфрама диаметром от 1 до 4 мм. Использование электродов из торированного вольфрама в связи с их радиоактивностью (незначительной) связано с определенными ограничениями.

ЛИТЫЕ ПРУТКИ ДЛЯ НАПЛАВКИ

Для наплавки износостойкого слоя на детали, работающие в условиях абразивного изнашивания, ударных нагрузок, коррозии, эррозии при повышенных температурах или в агрессивных средах, используют литые прутки по ГОСТ 21449—75, которые в зависимости от химического состава подразделяются на пять марок (типов): Пр-С27 (тип ПрН-У45Х28Н2СВМ); Пр-С1 (тип ПрН-У30Х28Н4С3); Пр-С2 (тип ПрН-У20Х17Н2); Пр-В3К (тип ПрН-У10ХК63В5) и Пр-В3К-Р (тип ПрН-У20ХК57В10). Прутки изготовляют с номинальными диаметрами: 4 мм при длине 300 и 350 мм; 5 и 6 мм при длине 350 и 400 мм; 8 мм при длине 450 и 500 мм. Предельные отклонения по диа-

метру ± 0,5 мм, по длине ± 25 мм. Поверхность прутков из сплавов марок Пр-В3К и Пр-В3К-Р должна быть шлифованной, из сплавов остальных марок — шлифованной или необработанной. На поверхности прутков не допускаются облои, заусенцы свыше 0,5 мм, включения шлака и пригар. Твердость слоя металла, наплавленного прутками марки Пр-С27, должна составлять не менее HRC 52, марки Пр-С1 — не менее HRC 50, марки Пр-С2 — не менее HRC 44, марки Пр-В3К — не менее HRC 40, марки Пр-В3К-Р — не менее HRC 46. Прутки для наплавки принимают партиями массой не более 500 кг. Партия должна состоять из прутков одной марки, одной плавки и одного размера, оформленных одним документом о качестве.

САМОЗАЩИТНАЯ И ПОРОШКОВАЯ ПРОВОЛОКИ

В качестве самозащитной проволоки при сварке открытой дугой наиболее широко используют стальную сварочную проволоку марок Св-15ГСТЮЦА и Св-20ГСТЮА по ГОСТ 2246—70. Благодаря легированию цирконием, церием, титаном и алюминием проволока указанных марок обеспечивает стабильность горения дуги и раскисление металла в сварочной ванне. Тем не менее, пластичность и ударная вязкость металла шва при этом сравнительно невелики, поэтому применение самозащитных проволок для сварки ответственных конструкций не рекомендуется.

Порошковую проволоку для автоматической и полуавтоматической дуговой сварки и наплавки изготовляют по техническим условиям (государственные стандарты отсутствуют). Оболочка порошковой проволоки представляет собой трубку, свернутую из стальной (чаще низкоуглеродистой) ленты толщиной 0,2—0,5 мм. Внутри оболочка заполнена смесью порошков из газо- и шлакообразующих компонентов. В порошковой проволоке ряда марок смесь порошков включает и легирующие компоненты. Наиболее широко используют порошковую проволоку диаметром от 1,6 до 3,0 мм.

Номенклатура и области применения порошковой проволоки весьма широки. Порошковую проволоку используют при дуговой сварке и наплавке в защитных газах (главным образом в углекислом газе), а также при дуговой наплавке (реже сварке) открытой дугой.

Конкретная область применения порошковой проволоки определяется ее маркой. Например, порошковую проволоку марок ПП-АН4 и ПП-АН8 используют для дуговой сварки в углекислом газе углеродистых и низколегированных сталей с временным сопротивлением разрыву до 50 кгс/мм^2; порошковую проволоку марки ПП-Г13-0 используют для наплавки открытой дугой деталей, подвергающихся абразивному изнашиванию и значительным ударным нагрузкам.

НАПЛАВОЧНЫЕ ЛЕНТЫ

Для наплавки используют стальную холоднокатаную, порошковую и металлокерамическую ленты. Все указанные наплавочные ленты изготовляют по техническим условиям (государственные стандарты отсутствуют).

В ряде случаев для наплавки используют стальную холоднокатаную ленту, изготовляемую по действующим стандартам, но предназначенную для другого применения. В частности, для наплавки некоторых деталей используют холоднокатаную ленту из коррозионно-стойкой и жаростойкой стали по ГОСТ 4986—70.

В технических условиях на стальную холоднокатаную наплавочную ленту часто регламентируют только химический состав металла ленты и некоторые

специальные требования, а все общие требования принимают по государственным стандартам на холоднокатаную ленту из соответствующей стали. Например, в технических условиях на стальную ленту для наплавки антикоррозионного покрытия общие требования приняты по ГОСТ 4986—70. В некоторых технических условиях на стальную холоднокатаную наплавочную ленту конкретных марок химический состав металла ленты аналогичен химическому составу сварочной или наплавочной проволоки соответствующих марок по ГОСТ 2246—70 и ГОСТ 10543—75. Используемая для наплавки обрезная холоднокатаная лента в большинстве случаев имеет толщину от 0,4 до 1,0 мм при ширине от 20 до 100 мм. Ленту поставляют в рулонах.

Порошковая наплавочная лента состоит из стальной секционной оболочки, заполненной смесью порошков из газообразующих, шлакообразующих и легирующих компонентов. Порошковую ленту некоторых изготовляемых марок используют при автоматической наплавке открытой дугой. Ленту поставляют в рулонах.

Металлокерамическую ленту изготовляют методом прокатки и спекания смеси порошкообразных материалов. Размеры ленты: толщина от 0,8 до 1,2 (±0,1) мм, ширина от 25 до 100 мм. Металлокерамическая лента обладает достаточной гибкостью и прочностью (минимальное временное сопротивление разрыву для ленты различных марок от 4 до 6 кгс/мм^2). Ленту поставляют в рулонах. Металлокерамическую ленту большинства изготовляемых марок используют при автоматической дуговой наплавке под флюсом.

Технические условия на порошковую и металлокерамическую ленты предусматривают изготовление ленты конкретных марок и устанавливают назначение (область применения) ленты каждой марки.

ПРИСАДОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ

К присадочным материалам для электрошлаковой сварки относятся электродные проволоки, пластинчатые и ленточные электроды, плавящиеся или подплавляемые мундштуки.

В качестве электродных проволок используют сварочную проволоку по соответствующим стандартам или техническим условиям. В качестве ленточных электродов используют холоднокатаную ленту толщиной 1—2 мм, имеющую химический состав, близкий к химическому составу основного металла. Пластинчатые электроды, плавящиеся и подплавляемые мундштуки изготовляют из металла той же марки, что и основной металл, или из металла, по химическому составу близкого к основному металлу.

ПРИСАДОЧНЫЕ КОЛЬЦА И ВСТАВКИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОРНЕВОГО СЛОЯ ШВА ПРИ СВАРКЕ ТРУБ

При дуговой сварке труб присадочные кольца и вставки используют в случае выполнения корневого слоя шва дуговой сваркой в защитных газах наплавящимся электродом (вне зависимости от способа дуговой сварки, применяемого для выполнения последующих слоев шва).

Для изготовления присадочных колец и вставок обычно используют сварочную проволоку, применяемую для сварки соединяемых труб. Присадочные кольца и вставки изготовляют грибовидными или плоскими (в сечении). Размеры присадочных колец и вставок определяют в зависимости от размеров, конструкции и типа сварного соединения.

При сварке труб из хромоникелевых сталей аустенитного класса во многих случаях применяют присадочные кольца и вставки из сварочной проволоки с регламентированным содержанием ферритной фазы.

Глава 2

ПОКРЫТЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ И НАПЛАВКИ

КЛАССИФИКАЦИЯ, РАЗМЕРЫ, ОБЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ СВАРКИ СТАЛЕЙ И НАПЛАВКИ

ГОСТ 9466—75 «Электроды покрытые металлические для ручной дуговой сварки сталей и наплавки. Классификация, размеры и общие технические требования» распространяется на электроды, изготовляемые способом опрессовки. Стандарт не распространяется на электроды для наплавки слоев из цветных металлов. В стандарте учтены требования рекомендации СЭВ по стандартизации РС 52—70 и международного стандарта ИСО 2560—73.

Классификация. По назначению электроды подразделяются:

У — для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву до 60 кгс/мм²;

Л — для сварки легированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву свыше 60 кгс/мм²;

Т — для сварки легированных теплоустойчивых сталей;

В — для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами;

Н — для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами.

Подразделение электродов на типы — по ГОСТ 9467—75, ГОСТ 10051—75 и ГОСТ 10052—75.

Электроды разделяют на марки по техническим условиям и паспортам. Каждому типу электродов могут соответствовать одна или несколько марок.

Электроды подразделяют по толщине покрытия в зависимости от отношения $\frac{D}{d}$ (см. рис. 1):

М — с тонким покрытием $\left(\frac{D}{d} \leqslant 1{,}20\right)$;

С — со средним покрытием $\left(1{,}20 < \frac{D}{d} \leqslant 1{,}45\right)$;

Д — с толстым покрытием $\left(1{,}45 < \frac{D}{d} \leqslant 1{,}80\right)$;

Г — с особо толстым покрытием $\left(\frac{D}{d} > 1{,}80\right)$.

В зависимости от требований к точности изготовления электродов, состоянию поверхности покрытия, сплошности выполненного данными электродами металла шва и содержанию серы и фосфора в наплавленном металле электроды разделяют на группы 1, 2 и 3.

По видам покрытия электроды подразделяют:

А — с кислым покрытием; Б — с основным покрытием; Ц — с целлюлозным покрытием; Р — с рутиловым покрытием; П — с покрытием прочих видов. При покрытии смешанного вида используют соответствующее двойное обозначение. При наличии в составе покрытия железного порошка в количестве более 20% к обозначению вида покрытия электродов следует добавлять букву Ж.

По допустимым пространственным положениям сварки или наплавки электроды подразделяют: 1 — для всех положений; 2 — для всех положений, кроме вертикального сверху вниз; 3 — для нижнего, горизонтального на вертикальной плоскости и вертикального снизу вверх; 4 — для нижнего и нижнего «в лодочку».

По роду и полярности применяемого при сварке или наплавке тока, а также по номинальному напряжению холостого хода используемого источника питания сварочной дуги переменного тока частотой 50 Гц электроды обозначают в соответствии с табл. 1.

1. Обозначения электродов по применяемому току и напряжению

Рекомендуемая полярность постоянного тока	Напряжение холостого хода источника переменного тока, В		Обозначения	Рекомендуемая полярность постоянного тока	Напряжение холостого хода источника переменного тока, В		Обозначения
	Номинальное	Предельные отклонения			Номинальное	Предельные отклонения	
Обратная	—	—	0	Любая Прямая Обратная	70	± 10	4 5 6
Любая Прямая Обратная	50	± 5	1 2 3	Любая Прямая Обратная	90	± 5	7 8 9

Примечание. Цифрой 0 обозначают электроды, предназначенные для сварки или наплавки только на постоянном токе обратной полярности.

Размеры. Размеры электродов должны соответствовать указанным на рис. 1 и в табл. 2. Предельные отклонения длины электродов не должны превышать: 3 мм для электродов 1-й группы; 2 мм для электродов 2-й и 3-й групп.

2. Размеры электродов, мм

Номинальный диаметр электрода d, определяемый диаметром стержня	Номинальная длина L электрода со стержнем из сварочной проволоки		Длина l зачищенного от покрытия конца (предельные отклонения ± 5)
	низкоуглеродистой или легированной	высоколегированной	
1,6	200, 250	150, 200 (250)	20
2,0	250 (300)	200, 250 (300)	
2,5	250, 300 (350)	250 (300)	
3,0	300, 350 (450)	300, 350	25
4,0	350, 450	350 (450)	
5,0; 6,0; 8,0	450	350, 450	30
10,0; 12,0			

Примечания: 1. Размеры, указанные в скобках, при изготовлении электродов использовать не рекомендуется.

2. Допускается изготовлять электроды с номинальным диаметром 3,15; 6,3 и 12,5 мм.

3. По соглашению между изготовителем и потребителем может быть установлена иная длина электродов.

4. По соглашению между изготовителем и потребителем покрытие с конца электрода на участке длиной l допускается не зачищать. При этом оба торца электрода должны быть зачищены как контактные.

5. Допускается округлая форма зачистки покрытия у контактного торца электрода.

6. По соглашению между изготовителем и потребителем допускается изготовление электродов с плоской зачисткой контактных торцов без конуса на покрытии.

Кривизна электродов не должна превышать: $0{,}004L$ для электродов 1-й группы; $0{,}003L$ для электродов 2-й группы; $0{,}002L$ для электродов 3-й группы.

Условное обозначение. Структура условного обозначения электродов приведена на рис. 2. Для электродов марок, не относящихся к типам по ГОСТ 9467—75,

ГОСТ 10051—75 или ГОСТ 10052—75, в условном обозначении тип электродов не приводят, а вместо обозначения стандарта на типы электродов указывают технические условия на электроды конкретной марки. В условном обозначении электродов для сварки углеродистых и низколегированных сталей с временным сопротивлением разрыву до 60 кгс/мм² после буквы Е тире не ставят. Приведенное на схеме условное обозначение должно быть указано на этикетках или в маркировке коробок, пачек и ящиков с электродами. В документации на электроды их условное обозначение должно состоять из марки, диаметра, группы электродов и обозначения стандарта (ГОСТ 9466—75).

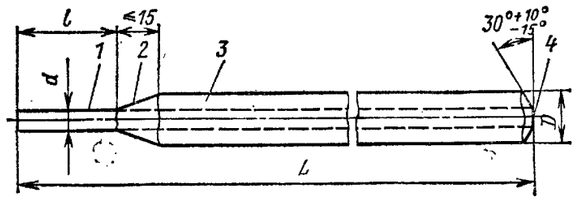


Рис. 1. Покрытый электрод:

1 — стержень; *2* — участок перехода; *3* — покрытие; *4* — контактный торец без покрытия

Изложенные указания по условному обозначению электродов не распространяются на конструкторскую и технологическую документацию.

Примеры условных обозначений. Электроды типа Э46А по ГОСТ 9467—75, марки УОНИИ-13/45, диаметром 3,0 мм, для сварки углеродистых и низколегированных сталей У, с толстым покрытием Д, 2-й группы, с установленной по

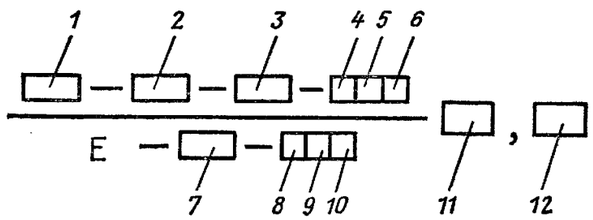


Рис. 2. Структура условного обозначения электродов:

1 — тип; *2* — марка; *3* — диаметр, мм; *4* — обозначение назначения электродов; *5* — обозначение толщины покрытия; *6* — группа электродов; *7* — группа индексов, указывающих характеристики наплавленного металла и металла шва по ГОСТ 9467—75, ГОСТ 10051—75 или ГОСТ 10052—75; *8* — обозначение вида покрытия; *9* — обозначение допустимых пространственных положений сварки или наплавки; *10* — обозначение рода применяемого при сварке или наплавке тока, полярности постоянного тока и номинального напряжения холостого хода источника питания сварочной дуги переменного тока частотой 50 Гц; *11* — обозначение стандарта (ГОСТ 9466—75); *12* — обозначение стандарта на типы электродов

ГОСТ 9467—75 группой индексов 43 2(5), указывающих характеристики наплавленного металла и металла шва, с основным покрытием Б, для сварки во всех пространственных положениях 1 на постоянном токе обратной полярности 0:

$$\frac{Э46А-УОНИИ\text{-}13/45-3{,}0-УД2}{Е43\ 2(5)-Б10}\ ГОСТ\ 9166\text{—}75,\ ГОСТ\ 9467\text{—}75$$ — на этикетках или в маркировке коробок, пачек и ящиков с электродами;

Электроды УОНИИ-13/45—3,0—2 ГОСТ 9466—75 — в документации.

Примечания: 1. В обозначении электродов марки УОНИИ-13/45 (также УОНИИ-13/55, УОНИИ-13/65 и др.) второе И часто опускают для сокращения количества знаков маркировки.

2. Многие предприятия, изготовляющие электроды марки УОНИИ-13/45, относят их к типу Э42А по ГОСТ 9467—75.

Электроды типа Э-09Х1МФ по ГОСТ 9467—75, марки ЦЛ-20, диаметром 4,0 мм, для сварки легированных теплоустойчивых сталей Т, с толстым покрытием Д, 3-й группы, с установленной по ГОСТ 9467—75 группой индексов 27, указывающих характеристики наплавленного металла и металла шва, с основным покрытием Б, для сварки во всех пространственных положениях 1 на постоянном токе обратной полярности 0:

$$\frac{Э\text{-}09Х1МФ-ЦЛ\text{-}20-4{,}0-ТД3}{Е-27-Б10}\ ГОСТ\ 9466\text{—}75,\ ГОСТ\ 9467\text{—}75$$ — на этикетках или в маркировке коробок, пачек и ящиков с электродами;

Электроды ЦЛ-20—4,0—3 ГОСТ 9466—75 — в документации.

Электроды типа Э-10Х25Н13Г2Б по ГОСТ 10052—75, марки ЦЛ-9, диаметром 5,0 мм, для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами В, с толстым покрытием Д, 1-й группы, с установленной по ГОСТ 10052—75 группой индексов 2075, указывающих характеристики наплавленного металла и металла шва, с основным покрытием Б, для сварки в нижнем, горизонтальном на вертикальной плоскости и вертикальном снизу вверх положениях 3 на постоянном токе обратной полярности 0:

$$\frac{Э\text{-}10Х25Н13Г2Б-ЦЛ\text{-}9-5{,}0-ВД1}{Е-2075-Б30}\ ГОСТ\ 9466\text{—}75,\ ГОСТ\ 10052\text{—}75$$ — на этикетках или в маркировке коробок, пачек и ящиков с электродами;

Электроды ЦЛ-9—5,0—1 ГОСТ 9466—75 — в документации.

Электроды типа Э-11Г3 по ГОСТ 10051—75, марки ОЗН-300У, диаметром 4,0 мм, для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами Н, с толстым покрытием Д, 1-й группы, с установленной по ГОСТ 10051—75 группой индексов 300/32—1, указывающих характеристики наплавленного металла, с основным покрытием Б, для наплавки в нижнем положении 4 на постоянном токе обратной полярности 0:

$$\frac{Э\text{-}11Г3-ОЗН\text{-}300У-4{,}0-НД1}{Е-300/32-1-Б40}\ ГОСТ9466\text{—}75,\ ГОСТ\ 10051\text{—}75$$ — на этикетках или в маркировке коробок, пачек и ящиков с электродами;

Электроды ОЗН-300У—4,0—1 ГОСТ 9466—75 — в документации.

Технические требования. Электроды должны быть изготовлены в соответствии с требованиями ГОСТ 9466—75 и ГОСТ 9467—75, ГОСТ 10051—75 или ГОСТ 10052—75, а также паспортов или технических условий на электроды конкретных марок.

Электроды марок, не относящихся к типам по ГОСТ 9467—75, ГОСТ 10051—75 или ГОСТ 10052—75, должны быть изготовлены в соответствии с требованиями ГОСТ 9466—75 и технических условий на электроды конкретной марки.

Порядок согласования, утверждения и регистрации технических условий — по ГОСТ 2. 115—70. При этом технические условия должны быть согласованы с организацией (предприятием)-разработчиком электродов конкретной марки и при отсутствии паспорта должны содержать все требования и данные, подлежащие включению в паспорт.

Стержни электродов должны быть из стальной сварочной проволоки, предназначенной для изготовления электродов, по ГОСТ 2246—70 или по техническим условиям, устанавливающим химический состав металла проволоки и предусматривающим остальные требования по ГОСТ 2246—70.

Покрытие электродов должно быть однородным, плотным, прочным, без вздутий, наплывов, надрывов и трещин за исключением поверхностных волосных трещин, допускаемых в пределах норм, указанных ниже.

На поверхности покрытия электродов 1-й и 2-й групп допускаются:

поры с максимальным наружным размером не более 1,5 толщины покрытия, но не более 2 мм, и глубиной не более 50% толщины покрытия, если на 100 мм длины электрода число пор не превышает трех для электродов 1-й группы и двух для электродов 2-й группы;

поверхностные продольные волосные трещины и местные сетчатые растрескивания в суммарном количестве не более двух на электрод при протяженности каждой волосной трещины или участка растрескивания не более 15 мм для электродов 1-й группы и не более 10 мм для электродов 2-й группы, если для проверки прочности покрытия отбирают электроды с волосными трещинами и сетчатым растрескиванием на поверхности покрытия.

На поверхности покрытия электродов допускаются отдельные продольные риски глубиной не более 25% толщины покрытия, а также местные вмятины глубиной не более 50% толщины покрытия в количестве не более четырех при суммарной протяженности до 25 мм на одном электроде. Две местные вмятины, расположенные с двух сторон в одном поперечном сечении, могут быть приняты за одну, если их суммарная глубина не превышает 50% толщины покрытия.

Для электродов 1-й группы на участке, примыкающем к зачищенному от покрытия контактному торцу, допускается оголенность стержня протяженностью по длине электрода не более половины диаметра стержня, но не более 3 мм. По соглашению между изготовителем и потребителем на электродах указанной группы с кислым, целлюлозным и рутиловым покрытиями протяженность оголенного участка стержня может быть увеличена до 75% диаметра стержня, но не более чем до 4 мм.

Допускаются местные задиры на поверхности покрытия, если их глубина не превышает 25% толщины покрытия, а их количество на одном электроде составляет не более трех для электродов 1-й группы, не более двух для электродов 2-й группы и не более одного для электродов 3-й группы.

Параметры шероховатости поверхности покрытия электродов, устанавливаемые ГОСТ 2789—73, должны быть: $Rz \leqslant 320$ мкм для электродов 1-й группы диаметром 4 мм и более; $Rz \leqslant 160$ мкм для электродов 1-й группы диаметром менее 4 мм и электродов 2-й и 3-й групп диаметром 4 мм и более; $Rz \leqslant 80$ мкм для электродов 2-й и 3-й групп диаметром менее 4 мм.

Разность e толщины покрытия в диаметрально противоположных участках электрода не должна превышать значений, указанных в табл. 3.

3. Требуемые значения e, мм

Номинальные диаметры электродов	Электроды					
	с тонким, средним и толстым покрытием			с особо толстым покрытием		
	Группы электродов					
	1	2	3	1	2	3
1,6	0,080	0,075	0,065	0,130	0,115	0,035
2,0	0,100	0,090	0,080	0,160	0,140	0,120
2,5	0,125	0,115	0,100	0,200	0,175	0,150
3,0	0,150	0,135	0,120	0,240	0,210	0,180
4,0	0,200	0,180	0,160	0,320	0,280	0,240
5,0	0,250	0,225	0,200	0,400	0,350	0,300
6,0 и более	0,360	0,270	0,240	0,480	0,420	0,360

По соглашению между изготовителем и потребителем допускаются другие значения e, но не более приведенных в табл. 4.

Покрытие не должно разрушаться при свободном падении электрода плашмя на гладкую стальную плиту с высоты: 1 м для электродов диаметром менее 4 мм; 0,5 м для электродов диаметром 4 мм и более. По соглашению между изготовителем и потребителем для электродов диаметром более 5 мм допускается снижение высоты падения до 0,3 м. Для электродов с особо толстым покрытием высота падения должна устанавливаться паспортом или техническими условиями на электроды конкретных марок. При проверке допускаются частичные откалывания покрытия общей протяженностью до 5% длины покрытой части электрода.

4. Допускаемые значения e, мм

Номинальные диаметры электродов	Электроды					
	с тонким, средним и толстым покрытием			с особо толстым покрытием		
	Группы электродов					
	1	2	3	1	2	3
1,6	0,115	0,095	0,080	0,160	0,145	0,130
2,0	0,140	0,120	0,100	0,200	0,180	0,160
2,5	0,175	0,150	0,125	0,250	0,225	0,200
3,0	0,210	0,180	0,150	0,300	0,270	0,240
4,0	0,280	0,240	0,200	0,400	0,360	0,320
5,0	0,350	0,300	0,250	0,500	0,450	0,400
6,0 и более	0,420	0,360	0,300	0,600	0,540	0,480

Сварочно-технологические свойства электродов при соблюдении режимов и условий сварки, установленных паспортом или техническими условиями на электроды конкретной марки, и при отсутствии магнитного дутья должны удовлетворять следующим требованиям:

дуга должна легко возбуждаться и стабильно гореть;

покрытие должно плавиться равномерно, без чрезмерного разбрызгивания, отваливания кусков и образования чехла или козырька, препятствующих нормальному плавлению электрода при сварке во всех пространственных положениях, рекомендованных для электродов данной марки соответствующего диаметра;

образующийся при сварке шлак должен обеспечивать правильное формирование валиков шва и легко удаляться после охлаждения;

в металле шва, а также в металле, наплавленном предназначенными для сварки электродами, не должно быть трещин, надрывов и поверхностных пор;

максимальные размеры внутренних газовых и шлаковых включений в металле шва, выполненного электродами диаметром до 5 мм, не должны быть более 0,3 d при сварке электродами 1-й группы, 0,25d при сварке электродами 2-й группы и 0,2d при сварке электродами 3-й группы, а в металле шва, выполненного электродами диаметром свыше 5 мм, не должны превышать 1,5 мм при сварке электродами 1-й группы, 1,3 мм при сварке электродами 2-й группы и 1,0 мм при сварке электродами 3-й группы;

5. Допустимое количество газовых и шлаковых включений в месте их наибольшего скопления на 100 мм длины шва

Группы электродов	Шов	
	однопроходный	многопроходный
1	3	5
2	2	3
3	1	2

количество внутренних газовых и шлаковых включений в металле шва не должно быть более указанного в табл. 5.

Поверхностные надрывы в кратере, полностью переплавляемые при последующем проходе, браковочным признаком не являются.

Если паспортом или техническими условиями на электроды конкретной марки предусмотрено удаление кратеров, надрывы и трещины в кратерах браковочным признаком не являются.

Допустимость, размеры и количество газовых и шлаковых включений, рыхлот, надрывов и трещин в наплавленном металле, выполненном электродами для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами, должны соответствовать требованиям паспорта или технических условий на электроды конкретной марки.

На отдельных электродах, суммарное число которых не должно превышать 10% общего числа электродов, входящих в партию, а также отобранных для проверки, допускается:

увеличение предельных отклонений длины L электрода до 4,5 мм для электродов 1-й группы и до 3 мм для электродов 2-й группы;

увеличение предельных отклонений длины l зачищенного от покрытия конца до 7,5 мм для электродов 1-й группы;

увеличение кривизны электрода до $0{,}006L$ для электродов 1-й группы;

увеличение числа пор на поверхности покрытия до трех на 100 мм длины электрода для электродов 2-й группы;

увеличение протяженности поверхностных продольных волосных трещин и участков местного сетчатого растрескивания на поверхности покрытия до 22,5 мм для электродов 1-й группы и до 15 мм для электродов 2-й группы;

увеличение суммарной протяженности вмятин на покрытии до 37,5 мм для электродов 1-й группы;

увеличение протяженности оголенного от покрытия участка, примыкающего к зачищенному от покрытия контактному торцу электрода, до 75% номинального диаметра электрода, но не более 4 мм для электродов 1-й группы и до 50% номинального диаметра электрода, но не более 3 мм для электродов 2-й группы;

увеличение глубины местных задиров на поверхности покрытия до 37,5% толщины покрытия для электродов 1-й группы;

увеличение числа местных задиров на поверхности покрытия до трех для электродов 2-й группы и до двух для электродов 3-й группы;

увеличение параметров шероховатости поверхности покрытия до $Rz \leqslant 320$ мкм для электродов 2-й группы и до $Rz \leqslant 160$ мкм для электродов 3-й группы;

увеличение разности e толщины покрытия до норм, указанных в табл. 4 для электродов соответствующей группы.

Каждая партия должна состоять из электродов одной марки, одного диаметра и одной группы. Все входящие в партию электроды должны быть изготовлены по одному технологическому процессу, на однотипном оборудовании, с постоянным составом покрытия из компонентов одних и тех же партий. Партия электродов со стержнями из легированной или высоколегированной проволоки должна быть изготовлена с использованием проволоки одной партии.

В случаях, установленных паспортом или техническими условиями на электроды конкретной марки, с согласия потребителя допускается изготовление партии электродов с использованием стержней из легированной или высоколегированной проволоки двух или нескольких партий, близких по химическому составу металла. При этом партии должны состоять из проволоки одной марки, одного диаметра, одного назначения и одного вида поверхности.

Масса партии электродов в зависимости от их назначения, диаметра и группы не должна превышать величин, указанных в табл. 6.

По соглашению между изготовителем и потребителем допускается увеличение массы партии электродов 1-й группы не более чем в 3 раза и электродов 2-й группы не более чем в 2 раза.

6. Масса партии электродов

Электрод	Диаметр электродов, мм	Масса, т		
		Группа электродов		
		1	2	3
Для сварки углеродистых и легированных конструкционных сталей	$\leqslant 4{,}0$	10	8	5
	$\geqslant 4{,}0$	20	15	10
Для сварки легированных теплоустойчивых сталей	$\leqslant 4{,}0$	5	3	2
	$\geqslant 4{,}0$	10	8	5
Для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами и для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами	$\leqslant 4{,}0$	3	2	1
	$\geqslant 4{,}0$	5	3	2

Методы испытаний. Качество поверхности покрытия электродов контролируют визуально без применения увеличительных приборов.

Длину L электрода, длину l зачищенного от покрытия конца, длину участка перехода и протяженность вмятин, волосных трещин и участков сетчатого растрескивания на поверхности покрытия измеряют с погрешностью 1 мм.

Кривизну электродов, протяженность оголенности стержня, глубину рисок, вмятин, задиров и размеры пор на поверхности покрытия измеряют с погрешностью 0,1 мм.

Шероховатость поверхности покрытия проверяют сравнением с эталонными образцами.

Разность e толщины покрытия определяют в трех местах электрода, смещенных относительно друг друга на 50—100 мм по длине и на 120° по окружности.

Измерения в каждом месте производят микрометром в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3, с погрешностью 0,005 мм.

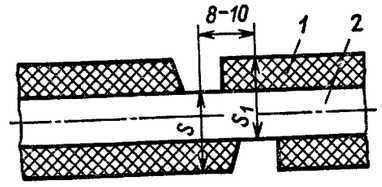


Рис. 3. Схема измерения разности толщины покрытия электрода:

1 — покрытие электрода; *2* — стержень электрода

Величина (мм)

$$e = S - S_1.$$

Допускается проверка разности толщины покрытия другими методами и специальными приборами (магнитными, емкостными и др.), обеспечивающими требуемую точность измерения.

Результаты проверки прочности покрытия оценивают внешним осмотром испытанных электродов и измерением обнаруженных отколов покрытия с погрешностью 1 мм.

Содержание влаги в покрытии определяют доведением снятого с каждого контролируемого электрода покрытия до постоянной массы при следующих температурах: 400 ± 10°С для основного покрытия; 180 ± 10° С для кислого и рутилового покрытий; 110 ± 5° С для целлюлозного покрытия. Для покрытий прочих и смешанных видов, а также для кислого и рутилового покрытий, содержащих целлюлозу, температуру принимают в соответствии с паспортом или техническими условиями на электроды контролируемой марки.

Содержание влаги в покрытии (%) вычисляют с погрешностью 0,1%:

$$B_{\text{п}} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} 100,$$

где m_1 — исходная масса покрытия, г; m_2 — постоянная масса покрытия, г.

Массу определяют взвешиванием с погрешностью 0,01 г.

Допускается определять содержание влаги в покрытии другими методами, обеспечивающими требуемую точность.

Коэффициент массы покрытия (%) вычисляют с погрешностью 0,1%:

$$K_{\text{п}} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} 100,$$

где m_1 — масса покрытой части электрода, г; m_2 — масса стержня этой же части электрода, г.

Массу определяют взвешиванием с погрешностью 0,1 г.

При проверке сварочно-технологических свойств электродов, предназначенных для сварки сталей, электродами контролируемой партии выполняют один односторонний сварной тавровый образец и один двусторонний сварной тавровый образец. В случаях, установленных паспортом или техническими условиями на электроды конкретной марки, вместо одностороннего сварного таврового образца выполняют трубный сварной стыковый образец. На двусторонних сварных тавровых образцах проверяют склонность швов к образованию трещин.

Если паспортом или техническими условиями на электроды контролируемой марки предусмотрена более жесткая проба для проверки склонности швов к образованию трещин, выполнение двусторонних сварных тавровых образцов не является обязательным.

В случаях, установленных паспортом или техническими условиями на электроды контролируемой марки, двусторонние сварные тавровые образцы допускается не выполнять, однако изготовитель обязан обеспечить отсутствие склонности к образованию трещин в сварных швах, выполненных электродами данной партии, в соответствии с требованиями ГОСТ 9466—75.

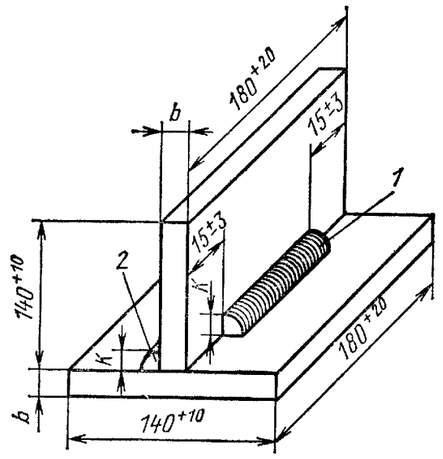


Рис. 4. Форма и размеры сварных тавровых образцов:

1 — контрольный сварной шов; *2* — сварной шов, обеспечивающий жесткость образца (выполняется только на двустороннем тавровом образце)

Для изготовления указанных сварных образцов при проверке электродов для сварки углеродистых конструкционных сталей следует использовать пластины из стали марки ВСт3сп по ГОСТ 380—71 и трубы из стали марки 20 по ГОСТ 1050—74.

Если электроды предназначены для сварки как углеродистых, так и низколегированных конструкционных сталей, марки стали пластин и труб должны соответствовать указанным в паспорте или технических условиях на электроды контролируемой марки.

Для изготовления сварных образцов при проверке электродов для сварки низколегированных, легированных и высоколегированных сталей следует использовать пластины и трубы из стали, для сварки которой предназначены электроды контролируемой марки.

Если электроды предназначены для сварки сталей нескольких марок или для сварки стали, из которой листовой прокат и трубы не изготовляют, марки стали пластин и труб должны соответствовать указанным в паспорте или технических условиях на электроды контролируемой марки.

Допускается замена пластин из низколегированных и легированных сталей пластинами из стали марки ВСт3сп по ГОСТ 380—71 и пластин из высоколегированных сталей пластинами из других сталей того же структурного класса при условии предварительной наплавки пластин контролируемыми электродами не менее чем в три слоя в местах наложения сварных швов и на примыкающих к ним участках шириной не менее 25 мм с механической обработкой наплавленных поверхностей. При этом допускается наплавка электродами других партий той же марки (в том числе другого диаметра).

7. Размеры тавровых образцов, мм

Диаметр проверяемых электродов	Толщина b пластин	Катет K шва
1,6; 2,0	3—5	2—3
2,5; 3,0; 3,15	6—10	4—5
4,0	10—16	6—8
5,0; 6,0; 6,3	14—20	8—10
8,0	20—25	10—12
10,0; 12,0; 12,5	25—30	12—14

Форма и размеры сварных тавровых образцов должны соответствовать указанным на рис. 4 и в табл. 7.

Трубные сварные стыковые образцы выполняют из двух отрезков труб, размеры которых должны соответствовать размерам, приведенным в табл. 8.

Для трубных сварных стыковых образцов конструктивные элементы подготовки кромок под сварку должны соответствовать элементам, приведенным на рис. 5, а выполненных швов — на рис. 6.

8. Размеры отрезков труб, мм

Диаметр проверяемых электродов	Наружный диаметр трубы	Толщина S стенки трубы	Минимальная длина каждого из свариваемых отрезков труб
До 2,5	32—42	3,5—5,0	100
Св. 2,5	108—133	8,0—10,0	120

Для проверки сварочно-технологических свойств электродов, предназначенных для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами, электродами контролируемой партии выполняют один наплавочный образец с четырьмя наплавленными слоями на пластине из стали марки ВСт3сп по ГОСТ 380—71 или из стали, для наплавки которой предназначены электроды. Размеры пластины должны быть 120 × 100 × 20 мм. Длина наплавки должна быть не менее 80 мм, а ширина — не менее восьми диаметров контролируемых электродов. Для электродов, обеспечивающих среднюю твердость наплавленного металла $HRC > 42$, допускается выполнять наплавочный образец с тремя или двумя наплавленными слоями, если это предусмотрено паспортом или техническими условиями на электроды контролируемой марки.

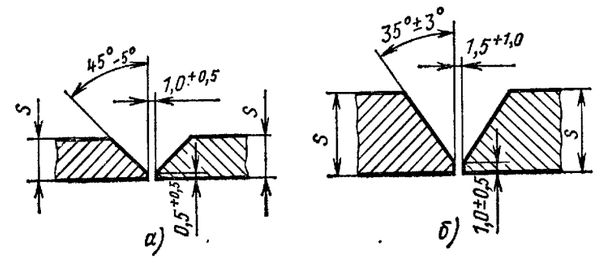


Рис. 5. Конструктивные элементы подготовки кромок трубных образцов под сварку:

а — при $S = 3{,}5 \div 5{,}0$ мм;
б — при $S = 8{,}0 \div 10{,}0$ мм

Сварку и наплавку образцов для проверки сварочно-технологических свойств электродов следует производить с соблюдением режимов и условий, установленных паспортом или техническими условиями на электроды контролируемой марки, при температуре окружающего воздуха не ниже +5° С в следующих пространственных положениях:

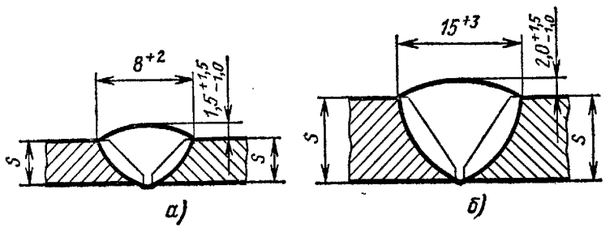


Рис. 6. Конструктивные элементы выполненных швов трубных сварных образцов:

а — при $S = 3{,}5 \div 5{,}0$ мм;
б — при $S = 8{,}0 \div 10{,}0$ мм

в положении, указанном в паспорте или технических условиях, при выполнении односторонних сварных тавровых образцов;

в положении «нижнее в лодочку» при выполнении двусторонних сварных тавровых образцов;

в неповоротном положении при горизонтальном расположении оси образца при выполнении трубных сварных стыковых образцов;

в нижнем положении при выполнении наплавочных образцов.

Сварку угловых швов тавровых образцов производят за один проход. При выполнении двусторонних сварных тавровых образцов оба угловых шва выполняют

в одном направлении, не допуская охлаждения образца. Контрольный шов сваривают после выполнения шва, обеспечивающего жесткость образца. В случаях, установленных паспортом или техническими условиями на электроды контролируемой марки, односторонние тавровые образцы допускается сваривать более чем за один проход. При этом катет шва должен соответствовать катету указанному в паспорте или технических условиях.

Легкость возбуждения и стабильность горения дуги, равномерность плавления электродов и правильность формирования валиков шва или наплавляемой поверхности, а также легкость удаления шлака контролируют наблюдением при сварке или наплавке образцов.

Контроль сварных соединений или наплавленных поверхностей образцов на отсутствие поверхностных трещин, надрывов и пор производят визуально с помощью лупы четырехкратного увеличения. Осмотр следует производить по всей протяженности швов и по всей площади наплавленных поверхностей после тщательного удаления шлака, брызг расплавленного металла и других загрязнений.

Проверку сплошности углового шва одностороннего сварного таврового образца и оценку допустимости размеров и количества внутренних газовых и шлаковых включений производят: после разрушения образца по шву осмотром поверхностей излома по всей площади и измерением выявленных включений, или радиографированием по ГОСТ 7512—75, или при последовательном снятии слоев металла шва осмотром поверхности каждого слоя по всей площади и измерением выявленных включений. В последнем случае толщина каждого снимаемого слоя должна быть равна половине максимально допустимого размера включений, параметры шероховатости поверхностей, подлежащих осмотру, не должны превышать Rz 40 мкм по ГОСТ 2789—73, а одно и то же включение, выявляемое более чем на двух поверхностях, является недопустимым. Контролируемые поверхности во всех случаях осматривают с помощью лупы четырехкратного увеличения. Допускается выполнять продольный надрез с поверхности шва для обеспечения его разрушения по критическому сечению.

По заказу потребителя проверка сплошности угловых швов, выполненных электродами 2-й и 3-й групп, должна быть произведена радиографированием или послойным исследованием. Право выбора метода проверки (из двух указанных) сохраняется за предприятием-изготовителем.

Проверку сплошности стыкового шва трубного сварного образца с оценкой допустимости размеров и количества внутренних газовых и шлаковых включений производят радиографированием по ГОСТ 7512—75 или при послойной проточке шва (по диаметру или с торца) осмотром поверхности каждого слоя через лупу четырехкратного увеличения и измерением размеров выявленных включений. Толщина каждого снимаемого при проточке слоя должна быть равной половине максимально допустимого размера включения. Параметры шероховатости подлежащих осмотру поверхностей не должны превышать Rz 40 мкм по ГОСТ 2789—73. Одно и то же включение, выявляемое более чем на двух поверхностях, является недопустимым.

Проверку сплошности шва трубного образца, выполненного электродами 1-й группы, допускается производить при поперечной разрезке образца по оси шва с последующим осмотром поверхностей реза по всей площади с помощью лупы четырехкратного увеличения. Ширина реза не должна превышать диаметра контролируемых электродов и не должна быть более 3 мм, а параметры шероховатости поверхностей реза не должны быть более Rz40 мкм по ГОСТ 2789—73.

Угловые швы двусторонних сварных тавровых образцов контролируют на отсутствие трещин осмотром через лупу четырехкратного увеличения трех поперечных макрошлифов, вырезанных из середины и концов контролируемого шва вне зоны расположения кратеров. При проверке угловых швов, выполненных электродами 1-й группы, контроль на отсутствие трещин может быть произведен на одном шлифе. В сомнительных случаях макроисследование заменяют микроисследованием тех же шлифов.

Сплошность наплавленного металла на наплавочных образцах проверяют осмотром наплавленной поверхности после предварительного снятия верхнего слоя на глубину 1,5—3,0 мм через лупу четырехкратного увеличения. При средней твердости наплавленного металла $HRC > 42$ допускается осмотр после шлифования наплавленной поверхности без снятия верхнего слоя на указанную глубину.

Для проверки химического состава наплавленного металла на пластине из стали марки ВСт3сп по ГОСТ 380—71 или из стали, для сварки или наплавки которой предназначены электроды, или из стали марок 08Х18Н10 или 12Х18Н9Т по ГОСТ 5632—72 выполняют восьмислойную наплавку электродами контролируемой партии. Размеры пластины должны быть 120 × 80 × 20 мм, а площадь наплавки — не менее 80 × 40 мм. Для электродов диаметром до 5 мм толщина пластин может быть уменьшена, но не должна быть менее четырех диаметров электрода.

При проверке электродов для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами, обеспечивающих среднюю твердость наплавленного металла $HRC > 42$, в случаях, установленных паспортом или техническими условиями на электроды контролируемой марки, допускается выполнение пятислойной наплавки.

Пробы для химического и спектрального анализов наплавленного металла следует отбирать из трех верхних слоев восьмислойной наплавки или из двух верхних слоев пятислойной наплавки в соответствии с ГОСТ 7122—75. Отбор стружки из наплавленного металла с содержанием углерода менее 0,04% производят в соответствии с дополнительными указаниями паспорта или технических условий на электроды контролируемой марки.

Химический и спектральный анализы наплавленного металла проводят по ГОСТ 2604.0—77 — ГОСТ 2604.12—77, ГОСТ 12344—66 — ГОСТ 12346—66; ГОСТ 12347—77, ГОСТ 12348—66 — ГОСТ 12365—66, ГОСТ 17051—71, ГОСТ 18895—73, ГОСТ 20560—75, ГОСТ 20813—75 и ГОСТ 22536.0—77 — ГОСТ 22536.13—77.

Перед отбором пробы допускается разупрочняющая термическая обработка наплавленного металла. Если при проверке электродов для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами применение разупрочняющей термической обработки не может обеспечить снижение средней твердости наплавленного металла до $HRC \leqslant 42$, в случаях, предусмотренных паспортом или техническими условиями на электроды контролируемой марки, допускается замена количественного анализа химического состава наплавленного металла его качественным спектральным анализом на подтверждение марочного состава. При этом изготовитель должен обеспечить соответствие химического состава металла, наплавленного контролируемыми электродами, требованиям ГОСТ 10051—75 и паспорта или технических условий.

Качественный спектральный анализ проводят на наличие, отсутствие или ориентировочное содержание легирующих элементов в соответствии с указаниями паспорта или технических условий на электроды контролируемой марки.

Для проверки механических свойств металла шва электродами контролируемой партии выполняют стыковое сварное соединение двух стальных пластин с предварительно приваренной стальной подкладкой сечением 30 × 10 мм (вариант А). Размеры каждой пластины должны соответствовать размерам, указанным в табл. 9.

При проверке электродов диаметром до 5 мм допускается выполнять стыковое сварное соединение двух

9. Ширина пластин (мм) при длине 330±±10 мм и толщине 20±1 мм

Диаметр проверяемых электродов	Ширина пластин (предельные отклонения ±10)
< 4,0	80
4,0	100
5,0; 6,0; 6,3	120
8,0	150
10,0; 12,0; 12,5	180

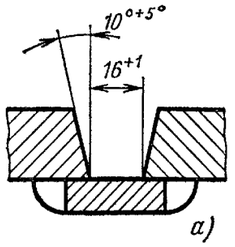
стальных пластин длиной 330 мм, шириной 100 мм и толщиной 14—18 мм каждая с подваркой корня шва электродами контролируемой марки (вариант Б).

Стыковые сварные соединения стальных пластин выполняют только при проверке электродов, предназначенных для сварки сталей.

Если паспортом или техническими условиями на электроды контролируемой марки предусмотрена проверка специальных свойств металла шва (дополнительная проверка механических свойств при высоких или низких температурах, проверка на межкристаллитную коррозию и др.), длина пластин должна быть соответственно увеличена или должны быть выполнены дополнительные стыковые сварные соединения.

Допускается выполнять отдельные стыковые сварные соединения для проверки металла шва на ударный изгиб.

При проверке электродов для сварки углеродистых конструкционных сталей или углеродистых и низколегированных конструкционных сталей пластины и подкладка должны быть из стали марки ВСт3сп по ГОСТ 380—71.



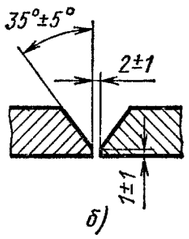
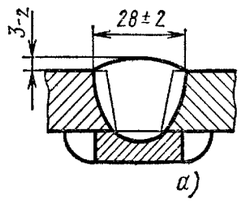


Рис. 7. Конструктивные элементы подготовки кромок стальных пластин под сварку:

а — вариант А; *б* — вариант Б



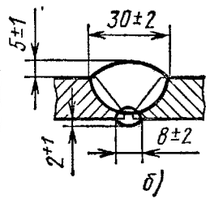


Рис. 8. Конструктивные элементы выполненных швов стыковых сварных соединений:

а — вариант А; *б* — варнант Б

При проверке электродов для сварки низколегированных, легированных и высоколегированных сталей пластины и подкладка должны быть из стали, для сварки которой предназначены электроды контролируемой марки. Если электроды предназначены для сварки низколегированных, легированных или высоколегированных сталей нескольких марок или для сварки стали, из которой листовой прокат не изготовляется, марка стали пластин и подкладки должна соответствовать указанной в паспорте или технических условиях на электроды контролируемой марки.

Допускается замена пластин и подкладок из низколегированных и легированных сталей пластинами и подкладками из стали марки ВСт3сп по ГОСТ 380—71 и пластин и подкладок из высоколегированных сталей пластинами и подкладками из других сталей того же структурного класса при условии предварительной наплавки контролируемыми электродами подлежащих сварке кромок пластин и поверхности подкладки. Наплавку следует выполнять не менее чем в три слоя до сборки соединения. Наплавленные кромки и поверхность подкладки должны быть подвергнуты механической обработке, после которой толщина наплавленного слоя должна составлять не менее 2,5 диаметра контролируемых электродов.

В случае предварительной наплавки кромок пластин и поверхности подкладки допускается увеличение ширины пластин и толщины подкладки на толщину наплавленного слоя. Допускается наплавка кромок пластин и поверхности подкладки электродами других партий той же марки (в том числе другого диаметра).

В стыковых сварных соединениях стальных пластин для проверки механических свойств металла шва конструктивные элементы подготовки кромок под сварку должны соответствовать приведенным на рис. 7, *а* выполненных швов — на рис. 8.

Кромки пластин под сварку следует подготовлять механическим способом. На пластинах из стали марки ВСт3сп допускается подготовка кромок механизированной кислородно-ацетиленовой резкой. Перед сваркой кромки пластин должны быть зачищены от ржавчины, окалины, масла и других загрязнений.

Сварку пластин следует производить с соблюдением режимов и условий, установленных паспортом или техническими условиями на электроды контролируемой марки (в том числе по предварительному и сопутствующему сварке подогревам), в нижнем положении, при температуре окружающего воздуха не ниже +5° С. Сварочный ток должен составлять 85—95% максимально допустимого для электродов контролируемой марки данного диаметра. Каждый электрод следует использовать полностью. Длина остающегося огарка должна быть не более 50 мм. Ширина каждого валика шва должна быть не более четырех диаметров проверяемых электродов, если паспортом или техническими условиями на электроды контролируемой марки не предусмотрены иные требования. Направление сварки следует менять при каждом очередном проходе. При сварке без подогрева каждый очередной проход следует выполнять после охлаждения металла ранее выполненной части шва до температуры ниже 250 °С, если другие требования не установлены паспортом или техническими условиями на электроды контролируемой марки.

Наложение подварочного валика в сварных соединениях, выполняемых по варианту Б, следует производить после удаления корневой части основного шва механическим способом (строганием, рубкой и т. д.) на глубину не менее 2 мм.

Выполненное стыковое сварное соединение подвергают термической обработке, если таковая предусмотрена паспортом или техническими условиями на электроды контролируемой марки. Режимы термической обработки должны соответствовать указанным в паспорте или технических условиях.

Из стыкового сварного соединения для проверки механических свойств металла шва вырезают и изготовляют три образца типа II для испытания на растяжение и три образца типов VI или IX для испытания на ударный изгиб (ударную вязкость) по ГОСТ 6996—66. Тип образцов для испытания на ударный изгиб (VI или IX) принимают в соответствии с указаниями паспорта или технических условий на электроды контролируемой марки. Если паспортом или техническими условиями предусмотрено испытание ударной вязкости металла шва на образцах типа IX, изготовитель должен также обеспечить соответствие ударной вязкости металла шва требованиям ГОСТ 9467—75 или ГОСТ 10052—75, хотя в этом случае испытание образцов типа VI не является обязательным.

Образцы вырезают механическим способом в соответствии со схемой, приведенной на рис. 9. Из сварных соединений, выполненных электродами для сварки углеродистых конструкционных сталей, допускается вырезка заготовок образцов механизированной кислородно-ацетиленовой резкой с припусками не менее 2,5 мм на каждую сторону.

Образцы для испытания на растяжение, а также рабочая часть образцов для испытания на ударный изгиб должны быть изготовлены целиком из металла шва.

Проверка механических свойств металла шва может быть заменена проверкой механических свойств наплавленного металла. При этом на пластине из стали марки ВСт3сп по ГОСТ 380—71 размером 350 × 100 × 20 мм электродами контролируемой марки выполняют предварительную пятислойную наплавку, на поверхность которой электродами проверяемой партии в продольном направлении наплавляют слои металла общей толщиной 20—24 мм. Площадь наплавки в верхней части должна быть не менее 330 × 65 мм. На выполняемые многослойные наплавки распространяются приведенные выше указания по сварке и термической обработке стыковых сварных соединений, а также по количеству, типам и способам вырезки образцов. Использование для вырезки образцов начального и конечного участков наплавки длиной по 30 мм и продольных краев наплавки шириной по 5 мм не допускается. Заготовки всех образцов должны быть вырезаны из верхних слоев наплавки без захвата металла предварительной пятислойной

наплавки. При этом заготовки образцов для испытания на растяжение следует вырезать вдоль направления наплавки, а заготовки образцов для испытания на ударный изгиб — поперек указанного направления.

Допускается выполнять предварительную пятислойную наплавку электродами других партий (в том числе другого диаметра). На участке вырезки образцов для испытания на растяжение ширина наплавки может быть уменьшена до 35 мм.

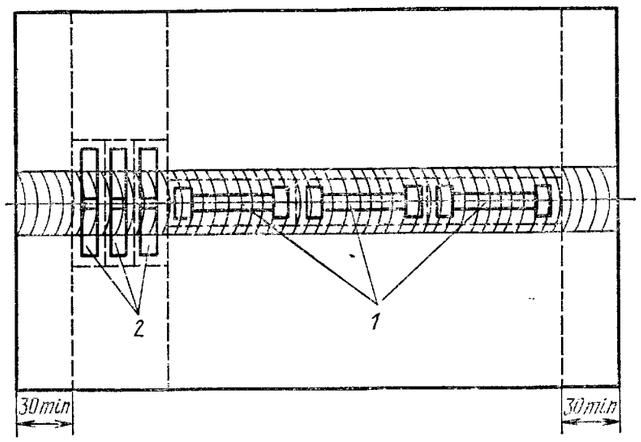


Рис. 9. Схема вырезки образцов для проверки механических свойств металла шва:

1 — образцы для испытания на статическое растяжение; *2* — образцы для испытания на ударный изгиб

При контроле электродов диаметром менее 3 мм, предназначенных для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву менее 60 кгс/мм², проверка механических свойств металла шва может быть заменена проверкой механических свойств сварного соединения, для чего электродами проверяемой партии сваривают две стальные пластины размером 250 × 90 × 3 мм каждая. Пластины должны быть из стали, для сварки которой предназначены электроды проверяемой марки. Если электроды предназначены для сварки сталей нескольких марок или для сварки стали, из которой листовой прокат не изготовляется, марка стали пластин должна соответствовать указанной в паспорте или технических условиях на электроды контролируемой марки.

Если паспортом или техническими условиями на электроды контролируемой марки предусмотрена проверка специальных свойств сварного соединения (дополнительная проверка механических свойств при высоких температурах, проверка на межкристаллитную коррозию и др.), размеры пластин должны быть соответственно увеличены или сварены дополнительные пластины.

В случаях, установленных паспортом или техническими условиями на электроды контролируемой марки, допускается замена проверки механических свойств металла шва проверкой механических свойств сварного соединения для электродов диаметром менее 3 мм, предназначенных для сварки легированных и высоколегированных сталей, с обязательным соблюдением следующих условий:

минимальное временное сопротивление разрыву металла свариваемых стальных пластин должно быть не ниже минимального временного сопротивления разрыву, допускаемого для металла шва, выполненного электродами контролируемой марки;

вид и режимы термической обработки сварного соединения перед механическими испытаниями должны обеспечивать минимальное временное сопротивление разрыву основного металла в разупрочненном участке зоны термического влияния сварки не ниже минимального временного сопротивления разрыву, допускаемого для металла шва, выполненного электродами контролируемой марки.

При выполнении сварного соединения электродами для сварки легированных или высоколегированных сталей допускается уменьшение толщины свариваемых пластин до 2 мм в случаях, предусмотренных паспортом или техническими условиями на электроды контролируемой марки.

Механические свойства сварного соединения, выполненного электродами для сварки легированных и высоколегированных сталей, должны соответствовать требованиям паспорта или технических условий на электроды контролируемой марки. При этом временное сопротивление разрыву сварного соединения должно удовлетворять требованиям, предъявляемым к металлу шва.

При выполнении сварного соединения пластины сваривают с двух сторон без разделки кромок с зазором, обеспечивающим отсутствие непровара. Необходимость и режимы термической обработки сварного соединения определяются указаниями паспорта или технических условий на электроды контролируемой марки.

Для проверки механических свойств сварного соединения из сваренных пластин вырезают и изготовляют три образца типа XIII для испытания на растяжение и три образца типа XXVIII для испытания на статический изгиб по ГОСТ 6996—66.

Образцы вырезают механическим способом в соответствии со схемой, приведенной на рис. 10.

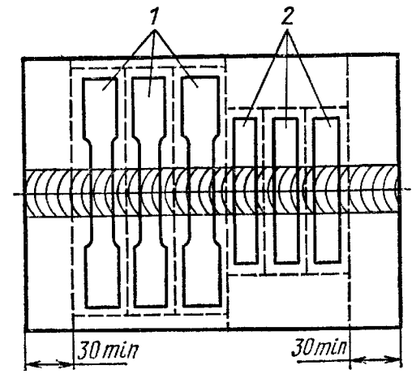


Рис. 10. Схема вырезки образцов для проверки механических свойств сварного соединения:

1 — образцы для испытания на статическое растяжение; *2* — образцы для испытания на статический изгиб

В случаях, установленных паспортом или техническими условиями на электроды контролируемой марки, допускается проведение испытания на растяжение на образцах типа XXIV, а на статический изгиб — на образцах типа XXVI по ГОСТ 6996—66.

Если при проверке электродов для сварки легированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву свыше 60 кгс/мм² сваренные пластины подлежат упрочняющей термической обработке для обеспечения требуемых механических свойств сварного соединения, допускается вырезка заготовок образцов после предварительной разупрочняющей термической обработки с последующей упрочняющей термической обработкой заготовок перед чистовой механической обработкой образцов.

Твердость наплавленного металла при контроле электродов для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами проверяют на поверхности восьмислойной или пятислойной наплавки, выполненной для контроля химического состава наплавленного металла, если другие условия проверки твердости не оговорены паспортом или техническими условиями на электроды контролируемой марки.

Испытания механических свойств металла шва, наплавленного металла и сварного соединения проводят в соответствии с ГОСТ 6996—66. Условия проведения испытаний и оценка их результатов должны соответствовать требованиям раздела 3 ГОСТ 6996—66 и паспорта или технических условий на электроды контролируемой марки.

При наличии соответствующих указаний в паспорте или технических условиях на электроды контролируемой марки до проведения испытаний на растяже-

ние и статический изгиб образцы или их заготовки выдерживают от 6 до 16 ч в электрической печи при 240—260° С или в течение 24 ч в кипящей воде для удаления водорода.

Содержание ферритной фазы в металле, наплавленном электродами диаметром более 2,5 мм, определяют объемным магнитным методом с использованием ферритометров, обеспечивающих погрешность измерения не более 10% измеряемой величины. Для определения содержания ферритной фазы указанным методом на пластине размером 160 × 80 × 15 мм из стали марки ВСт3сп по ГОСТ 380—71 или из стали, для сварки которой предназначены электроды контролируемой марки, или из стали марок 08Х18Н10 или 12Х18Н9Т по ГОСТ 5632—72 электродами каждой контролируемой партии выполняют семислойную наплавку в соответствии со схемой, приведенной на рис. 11. При выполнении наплавки на пластину из стали, для сварки которой предназначены электроды контролируемой марки, или из стали марок 08Х18Н10 или 12Х18Н9Т по ГОСТ 5632—72 число наплавляемых слоев может быть уменьшено до пяти.

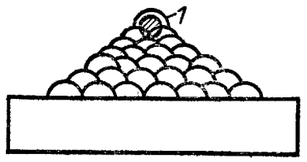


Рис. 11. Схема выполнения многослойной наплавки для определения содержания ферритной фазы:

1 — место отбора контрольных образцов

Наплавку производят на режимах, регламентированных паспортом или техническими условиями на электроды контролируемой марки. Длина наплавки должна составлять не менее 150 мм. Перед наложением каждого последующего валика ранее наплавленный металл должен быть охлажден до температуры ниже 100° С.

Из семислойной или пятислойной наплавки вырезают и изготовляют два контрольных образца длиной 60 ± 1 мм и диаметром 5,0 ± 0,1 мм. Контрольные образцы испытывают согласно инструкции по эксплуатации ферритометра.

Содержание ферритной фазы в металле, наплавленном электродами диаметром до 2,5 мм, определяют металлографическим методом по ГОСТ 11878—66 в трех верхних слоях восьмислойной наплавки, выполненной для проверки химического состава наплавленного металла. При выполнении восьмислойной наплавки электродами, подлежащими проверке на содержание ферритной фазы в наплавленном металле, размер пластин может быть увеличен, а после наплавки каждого слоя пластину следует охлаждать водой.

Металл шва, наплавленный металл и сварное соединение испытывают на межкристаллитную коррозию по ГОСТ 6032—75. Метод испытания принимают в соответствии с указаниями паспорта или технических условий на электроды контролируемой марки.

При неудовлетворительных результатах проверки содержания влаги в покрытии, а также при недопустимых размерах или количестве газовых включений, выявленных в металле шва или наплавленном металле при проверке сварочно-технологических свойств, допускается повторное прокаливание всех электродов контролируемой партии с последующей проверкой соответствующих показателей.

ТИПЫ ПОКРЫТЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ И ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ

Согласно ГОСТ 9467—75 электроды подразделяются на следующие типы:

Э38, Э42, Э46 и Э50 — для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву до 50 кгс/мм²;

Э42А, Э46А и Э50А — для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву до 50 кгс/мм², когда

к металлу сварных швов предъявляют повышенные требования по пластичности и ударной вязкости;

Э55 и Э60 — для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву свыше 50 до 60 кгс/мм²;

Э70, Э85, Э100, Э125, Э150 — для сварки легированных конструкционных сталей повышенной и высокой прочности с временным сопротивлением разрыву свыше 60 кгс/мм²;

Э-09М, Э-09МХ, Э-09Х1М, Э-05Х2М, Э-09Х2М1, Э-09Х1МФ, Э-10Х1М1НФБ, Э-10Х3М1БФ, Э-10Х5МФ — для сварки легированных теплоустойчивых сталей.

Химический состав металла, наплавленного электродами для сварки конструкционных сталей, должен соответствовать требованиям технических условий или паспортов на электроды конкретных марок. При этом содержание серы и фосфора в наплавленном металле не должно превышать указанного в табл. 10.

10. Предельнос содержание серы и фосфора в наплавленном металле, %

Тип электродов	Сера			Фосфор		
	Группа электродов по ГОСТ 9466—75					
	1	2	3	1	2	3
Э38 Э42 Э46 Э50	0,045	0,040	0,035	0,050	0,045	0,040
Э42А Э46А Э50А Э55 Э60	0,035	0,030	0,025	0,040	0,035	0,030
Э70 Э85 Э100 Э125 Э150						0,035

Механические свойства металла шва, наплавленного металла и сварного соединения, выполненных электродами для сварки конструкционных сталей, должны соответствовать нормам, приведенным в табл. 11.

Химический состав металла, наплавленного электродами для сварки легированных теплоустойчивых сталей, а также механические свойства наплавленного металла или металла шва должны соответствовать нормам, приведенным в табл. 12.

Приведенные в табл. 11 и 12 требования к химическому составу наплавленного металла и механическим свойствам металла шва, наплавленного металла и сварных соединений должны быть проверены при испытании электродов в соответствии с требованиями ГОСТ 9466—75.

Условное обозначение электродов для дуговой сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей — по ГОСТ 9466—75. При этом во второй строке условного обозначения электродов группа индексов, указывающих характеристики наплавленного металла и металла шва, должна быть записана согласно требованиям, приведенным ниже.

В условном обозначении электродов для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву до 60 кгс/мм² группа индексов, указывающих характеристики наплавленного металла и металла шва, устанавливается согласно табл. 13.

11. Механические свойства при нормальной температуре

Типы электродов	Металл шва и наплавленный металл			Сварное соединение, выполненное электродами диаметром менее 3 мм		Типы электродов	Металл шва и наплавленный металл			Сварное соединение, выполненное электродами диаметром менее 3 мм	
	$\sigma_в$, кгс/мм²	δ_5, %	$a_н$, кгс·м/см²	$\sigma_в$, кгс/мм²	Угол загиба, градусы		$\sigma_в$, кгс/мм²	δ_5, %	$a_н$, кгс·м/см²	$\sigma_в$, кгс/мм²	Угол загиба, градусы
	не менее						не менее				
Э38	38	14	3	38	60	Э55	55	20	12	55	150
Э42	42	18	8	42	150	Э60	60	18	10	60	120
Э46	46	18	8	46	150	Э70	70	14	6	—	—
Э50	50	16	7	50	120	Э85	85	12	5	—	—
Э42А	42	22	15	42	180	Э100	100	10	5	—	—
Э46А	46	22	14	46	180	Э125	125	8	4	—	—
Э50А	50	20	13	50	150	Э150	150	6	4	—	—

Примечания: 1. Для электродов типов Э38, Э42, Э46, Э50, Э42А, Э46А, Э50А, Э55 и Э60 приведенные в таблице механические свойства установлены для металла шва, наплавленного металла и сварного соединения в состоянии после сварки (без термической обработки). Механические свойства металла шва, наплавленного металла и сварного соединения после термической обработки для электродов перечисленных типов должны соответствовать требованиям технических условий или паспортов на электроды конкретных марок.

2. Для электродов типов Э70, Э85, Э100, Э125 и Э150 приведенные в таблице механические свойства установлены для металла шва и наплавленного металла после термической обработки по режимам, регламентированным техническими условиями или паспортами на электроды конкретных марок. Механические свойства металла шва и наплавленного металла в состоянии после сварки для электродов перечисленных типов должны соответствовать требованиям технических условий или паспортов на электроды конкретных марок.

3. Механические свойства сварных соединений, выполненных электродами типов Э70, Э85, Э100, Э125, Э150 диаметром менее 3 мм, должны соответствовать требованиям технических условий или паспортов на электроды конкретных марок.

В условном обозначении электродов для сварки легированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву свыше 60 кгс/мм² группа индексов, обозначающих характеристики наплавленного металла и металла шва, указывает среднее содержание основных химических элементов в наплавленном металле, а также минимальную температуру $T_х$, при которой ударная вязкость металла шва и наплавленного металла при испытании образцов типа IX по ГОСТ 6996—66 составляет не менее 3,5 кгс·м/см², и должна включать:

первый индекс из двузначного числа, соответствующего среднему содержанию углерода в наплавленном металле в сотых долях процента;

последующие индексы, каждый из которых состоит из буквенного обозначения соответствующего основного химического элемента и стоящего за ним числа, показывающего среднее содержание этого элемента в наплавленном металле в процентах (с погрешностью до 1%);

12. Химический состав наплавленного металла (%) и механические свойства металла шва и наплавленного металла при нормальной температуре

Типы электродов	C	Si	Mn	Cr	Ni
Э-09М	0,06—0,12	0,15—0,35	0,4—0,9	—	—
Э-09МХ	0,06—0,12	0,15—0,35	0,4—0,9	0,35—0,65	—
Э-09Х1М	0,06—0,12	0,15—0,40	0,5—0,9	0,80—1,20	—
Э-05Х2М	0,03—0,08	0,15—0,45	0,5—1,0	1,70—2,20	—
Э-09Х2М1	0,06—0,12	0,15—0,45	0,5—1,0	1,90—2,50	—
Э-09Х1МФ	0,06—0,12	0,15—0,40	0,5—0,9	0,80—1,25	—
Э-10Х1М1НФБ	0,07—0,12	0,15—0,40	0,6—0,9	1,00—1,40	0,6—0,9
Э-10Х3М1БФ	0,07—0,12	0,15—0,45	0,5—0,9	2,40—3,00	—
Э-10Х5МФ	0,07—0,13	0,15—0,45	0,5—0,9	4,00—5,50	—

Типы электродов	Mo	V	Nb	S	P	$\sigma_в$, кгс/мм²	δ_5, %	$a_н$, кгс·м/см²
				не более		не менее		
Э-09М	0,35—0,65	—	—	0,030	0,030	45	18	10
Э-09МХ	0,35—0,65	—	—	0,025	0,035	46	18	9
Э-09Х1М	0,40—0,70	—	—	0,025	0,035	48	18	9
Э-05Х2М	0,40—0,70	—	—	0,020	0,030	48	18	9
Э-09Х2М1	0,80—1,10	—	—	0,025	0,035	50	16	8
Э-09Х1МФ	0,40—0,70	0,10—0,30	—	0,025	0,030	50	16	8
Э-10Х1М1НФБ	0,70—1,00	0,15—0,35	0,07—0,30	0,025	0,030	50	15	7
Э-10Х3М1БФ	0,70—1,00	0,25—0,50	0,35—0,60	0,025	0,030	55	14	6
Э-10Х5МФ	0,35—0,65	0,10—0,35	—	0,025	0,035	55	14	6

Примечания: 1. Приведенные в таблице механические свойства установлены для металла шва и наплавленного металла после термической обработки по режимам, регламентированным техническими условиями или паспортами на электроды конкретных марок.

2. Механические свойства сварных соединений, выполненных электродами диаметром менее 3 мм, должны соответствовать требованиям технических условий или паспортов на электроды конкретных марок.

последний индекс, характеризующий $T_х$:

$T_х$, °С	Не регламентирована	+20	0	—20	—30	—40	—50	—60
Индекс	0	1	2	3	4	5	6	7

К основным химическим элементам, кроме углерода, следует относить только легирующие элементы, определяющие механические свойства наплавленного металла. При этом кремний и марганец считают основными химическими элементами, если их среднее содержание в наплавленном металле превышает 0,8%.

Порядок расположения буквенных обозначений химических элементов определяется уменьшением среднего содержания соответствующих элементов в наплавленном металле. При среднем содержании основного химического элемента в наплавленном металле менее 0,8% число за буквенным обозначением химического элемента не указывают.

Химические элементы, содержащиеся в наплавленном металле, обозначают: А — азот, Б — ниобий, В — вольфрам, Г — марганец, Д — медь, К — кобальт, М — молибден, Н — никель, Р — бор, С — кремний, Т — титан, Ф — ванадий, Х — хром, Ю — алюминий.

В группе индексов перед последним индексом ставят тире.

13. **Группа индексов, указывающих характеристики наплавленного металла и металла шва**

Группа индексов	При нормальной температуре: $\sigma_в$, не менее, Н/мм²	$\sigma_в$, не менее, кгс/мм²	δ_5, %, не менее	$T_х$, °С	Группа индексов	При нормальной температуре: $\sigma_в$, не менее, Н/мм²	$\sigma_в$, не менее, кгс/мм²	δ_5, %, не менее	$T_х$, °С
37 0	370	38	При любом значении	При любом значении	43 3	430	44	24	—20
					43 4	430	44	24	—30
					43 5	430	44	24	—40
					43 6	430	44	24	—50
41 0	410	42	< 20	Не регламентирована	43 7	430	44	24	—60
41 1	410	42	20	+20	51 0	510	52	< 18	Не регламентирована
41 2	410	42	22	0					
41 3	410	42	24	—20					
41 4	410	42	24	—30	51 1	510	52	18	+20
41 5	410	42	24	—40	51 2	510	52	18	0
41 6	410	42	24	—50	51 3	510	52	20	—20
41 7	410	42	24	—60	51 4	510	52	20	—30
43 0	430	44	< 20	Не регламентирована	51 5	510	52	20	—40
					51 6	510	52	20	—50
					51 7	510	52	20	—60
43 1	430	44	20	+20					
43 2	430	44	22	0					

Примечание. В группе индексов первые два индекса указывают минимальное значение $\sigma_в$, а третий индекс одновременно характеризует минимальные значения δ_5 и $T_х$. Если показатели δ_5 и $T_х$ согласно табл. 13 соответствуют различным индексам, третий индекс устанавливается по минимальному значению показателя δ_5, а в группу индексов вводится указываемый в скобках четвертый дополнительный индекс, характеризующий показатель $T_х$ (см. пример составления группы индексов для электродов марки УОНИИ-13/45).

В условном обозначении электродов для сварки легированных теплоустойчивых сталей группа индексов, указывающих характеристики наплавленного металла и металла шва, должна включать два индекса. Первый индекс указывает $T_х$, а второй максимальную рабочую температуру, при которой регламентированы показатели длительной прочности наплавленного металла и металла шва:

Максимальная рабочая температура, °С	Индекс	Максимальная рабочая температура, °С	Индекс
Не регламентирована или ниже 450	0		
450—465	1	530—545	5
470—485	2	550—565	6
490—505	3	570—585	7
510—525	4	590—600	8
		Св. 600	9

Все данные, необходимые для составления указанных групп индексов, должны быть взяты из технических условий или паспортов на электроды конкретных марок.

В группе индексов условного обозначения электродов для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву до 60 кгс/мм² следует приводить данные для металла шва и наплавленного металла в состоянии после сварки (без термической обработки).

В группе индексов условного обозначения электродов для сварки легированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву свыше 60 кгс/мм², а также для сварки легированных теплоустойчивых сталей следует приводить данные для металла шва и наплавленного металла после термической обработки по режимам, регламентированным техническими условиями или паспортами на электроды конкретных марок.

При отсутствии в паспортах или технических условиях данных, необходимых для индексации соответствующих показателей механических свойств металла шва и наплавленного металла, эти показатели рассматривают как нерегламентированные.

Примеры составления групп индексов, указывающих характеристики наплавленного металла и металла шва, для условного обозначения электродов. Группа индексов для электродов марки УОНИИ-13/45 (типа Э46А), обеспечивающих следующие механические свойства металла шва и наплавленного металла в состоянии после сварки при нормальной температуре: временное сопротивление разрыву не менее 46 кгс/мм² (43); относительное удлинение не менее 22% (2); выполненный электродами наплавленный металл и металл шва в состоянии после сварки имеет $T_х = -40°$ С (5):

43 2(5)

Группа индексов для электродов марки ЦЛ-18 (типа Э85), обеспечивающих получение наплавленного металла со средним содержанием 0,18% С, 1% Cr, 1% Mn; выполненный электродами наплавленный металл и металл шва после термической обработки имеет $T_х = -10°$ С (2);

18Х1Г1—2

Группа индексов для электродов марки ЦЛ-20 (типа Э-09Х1МФ), обеспечивающих получение наплавленного металла и металла шва после термической обработки с $T_х = 0°$ С (?); показатели длительной прочности наплавленного металла и металла шва регламентированы до температуры 580° С (7):

27

ТИПЫ ПОКРЫТЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ С ОСОБЫМИ СВОЙСТВАМИ

Покрытые электроды для ручной дуговой сварки коррозионно-стойких, жаропрочных и жаростойких высоколегированных сталей мартенситного, мартенситно-ферритного, ферритного, аустенитно-ферритного и аустенитного классов согласно ГОСТ 10052—75 подразделяются на следующие основные типы:

Э-12Х13, Э-06Х13Н, Э-10Х17Т, Э-12Х11НМФ, Э-12Х11НВМФ, Э-14Х11НВМФ, Э-10Х16Н4Б, Э-08Х24Н6ТАФМ, Э-04Х20Н9, Э-07Х20Н9, Э-02Х21Н10Г2, Э-06Х22Н9, Э-08Х16Н8М2, Э-08Х17Н8М2, Э-06Х19Н11Г2М2, Э-02Х20Н14Г2М2, Э-02Х19Н9Б, Э-08Х19Н10Г2Б, Э-08Х20Н9Г2Б, Э-10Х17Н13С4, Э-08Х19Н10Г2МБ, Э-09Х19Н10Г2М2Б, Э-08Х19Н9Ф2С2, Э-08Х19Н9Ф2Г2СМ, Э-09Х16Н8Г3М3Ф, Э-09Х19Н11Г3М2Ф, Э-07Х19Н11М3Г2Ф, Э-08Х24Н12Г3СТ, Э-10Х25Н13Г2, Э-12Х24Н14С2, Э-10Х25Н13Г2Б, Э-10Х28Н12Г2, Э-03Х15Н9АГ4, Э-10Х20Н9Г6С, Э-28Х24Н16Г6, Э-02Х19Н15Г4АМ3В2, Э-02Х19Н18Г5АМ3, Э-11Х15Н25М6АГ2, Э-09Х15Н25М6Г2Ф, Э-27Х15Н35В3Г2Б2Т, Э-04Х16Н35Г6М7Б, Э-06Х25Н40М7Г2, Э-08Н60Г7М7Т, Э-08Х25Н60М10Г2, Э-02Х20Н60М15В3, Э-04Х10Н60М24, Э-08Х14Н65М15В4Г2, Э-10Х20Н70Г2М2В, Э-10Х20Н70Г2М2Б2В.

Химический состав наплавленного металла и механические свойства металла шва и наплавленного металла при нормальной температуре должны соответствовать указанным в табл. 14.

14. Химический состав (%) наплавленного металла и механические свойства металла шва и наплавленного металла

Типы электродов	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	V	Прочие элементы	S	P	$\sigma_в$, кгс/мм²	δ_5, %	$a_н$, кгс·м/см²
										не более		не менее		
Э-12Х13	0,08—0,16	0,30—1,00	0,50—1,50	11,00—14,00	⩽ 0,60	—	—	—	—	0,030	0,035	60	16	5
Э-06Х13Н	⩽ 0,08	⩽ 0,40	0,20—0,60	11,50—14,50	1,00—1,50	—	—	—	—	0,030	0,035	65	14	5
Э-10Х17Т	⩽ 0,14	1,00	⩽ 1,20	15,00—18,00	⩽ 0,60	—	—	—	0,05—0,20 Ti	0,030	0,040	65	—	—
Э-12Х11НМФ	0,09—0,15	0,30—0,70	0,50—1,10	10,00—12,00	0,60—0,90	0,60—0,90	—	0,20—0,40	—	0,030	0,035	70	15	5
Э-12Х11НВМФ	0,09—0,15	0,30—0,70	0,50—1,10	10,00—12,00	0,60—0,90	0,60—0,90	—	0,20—0,40	0,80—1,30 W	0,030	0,035	75	14	5
Э-14Х11НВМФ	0,11—0,16	⩽ 0,50	0,30—0,80	10,00—12,00	0,80—1,10	0,90—1,25	—	0,20—0,40	0,90—1,40 W	0,030	0,035	75	12	4
Э-10Х16Н4Б	0,05—0,13	⩽ 0,70	⩽ 0,80	14,00—17,00	3,60—4,50	—	0,02—0,12	—	—	0,030	0,035	100	8	4
Э-08Х24Н6ТАФМ	⩽ 0,10	⩽ 0,70	⩽ 1,20	22,00—26,00	5,00—6,50	0,05—0,10	—	0,05—0,15	0,02—0,08 Ti; N ⩽ 0,20	0,020	0,035	70	15	5
Э-04Х20Н9	⩽ 0,06	0,30—1,20	1,00—2,00	18,00—22,50	7,50—10,00	—	—	—	—	0,018	0,030	55	30	10
Э-07Х20Н9	⩽ 0,09	0,30—1,20	1,00—2,00	18,00—21,50	7,50—10,00	—	—	—	—	0,020	0,030	55	30	10
Э-02Х21Н10Г2	⩽ 0,03	⩽ 1,10	1,00—2,50	18,00—24,00	9,00—11,50	—	—	—	—	0,020	0,025	55	30	10
Э-06Х22Н9	⩽ 0,08	0,20—0,70	1,20—2,00	20,50—23,50	7,50— 9,60	—	—	—	—	0,020	0,030	65	20	—
Э-08Х16Н8М2	0,05—0,12	⩽ 0,60	1,00—2,00	14,60—17,50	7,20— 9,00	1,40—2,00	—	—	—	0,020	0,030	55	30	10
Э-08Х17Н8М2	0,05—0,12	1,00	0,80—2,00	15,50—19,50	7,20—10,00	1,40—2,50	—	—	—	0,020	0,030	55	30	10
Э-06Х19Н11Г2М2	⩽ 0,08	⩽ 0,80	1,20—2,50	16,50—20,00	9,00—12,00	1,20—3,00	—	—	—	0,020	0,030	50	25	9
Э-02Х20Н14Г2М2	⩽ 0,03	1,00	1,00—2,50	17,50—22,50	13,00—15,50	1,80—3,20	—	—	—	0,020	0,025	55	25	10
Э-02Х19Н9Б	⩽ 0,04	0,60	0,80—2,00	17,00—20,00	8,00—10,50	—	0,35—0,70	—	—	0,020	0,030	55	30	12
Э-08Х19Н10Г2Б	0,05—0,12	⩽ 1,30	1,00—2,50	18,00—20,50	8,50—10,50	—	0,70—1,30, но ⩾ 8 С	—	—	0,020	0,030	55	24	8
Э-08Х20Н9Г2Б	0,05—0,12	⩽ 1,30	1,00—2,50	18,00—22,00	8,00—10,50	—	0,70—1,30, но ⩾ 8 С	—	—	0,020	0,030	55	22	8
Э-10Х17Н13С4	⩽ 0,14	3,50—5,50	0,80—2,00	15,50—20,00	11,00—15,00	—	—	—	—	0,030	0,040	60	15	4
Э-08Х19Н10Г2МБ	0,05—0,12	0,25—0,70	1,60—2,50	17,50—20,50	8,50—10,50	0,40—1,00	0,70—1,30, но ⩾ 8 С	—	—	0,025	0,035	60	24	7
Э-09Х19Н10Г2М2Б	⩽ 0,12	⩽ 1,20	1,00—2,50	17,00—20,00	8,50—12,00	1,80—3,00	0,70—1,30, но ⩾ 8 С	—	—	0,020	0,030	60	22	7
Э-08Х19Н9Ф2С2	⩽ 0,10	1,00—2,00	1,00—2,00	17,50—20,50	7,50—10,00	—	—	1,50—2,30	—	0,030	0,035	60	25	8
Э-08Х19Н9Ф2Г2СМ	⩽ 0,10	0,70—1,50	1,00—2,50	17,00—20,50	7,50—10,00	0,20—0,60	—	2,00—2,60	—	0,030	0,035	60	22	8
Э-09Х16Н8ГЗМЗФ	0,05—0,13	⩽ 1,30	2,00—3,20	15,00—17,50	7,00— 9,00	2,40—3,20	—	0,40—0,65	—	0,020	0,030	65	28	6
Э-09Х19Н11Г3М2Ф	0,06—0,12	⩽ 0,50	2,80—4,00	17,50—20,00	9,50—12,00	1,80—2,70	—	0,35—0,60	—	0,020	0,030	58	22	5
Э-07Х19Н11М3Г2Ф	⩽ 0,09	⩽ 0,60	1,50—3,00	17,00—20,00	9,50—12,00	2,00—3,50	—	0,35—0,75	—	0,020	0,030	55	25	8
Э-08Х24Н12ГЗСТ	0,05—0,11	0,70—1,30	2,20—3,80	22,00—26,00	10,50—13,00	—	—	—	Ti ⩽ 0,30	0,025	0,035	55	25	9
Э-10Х25Н13Г2	⩽ 0,12	⩽ 1,00	1,00—2,50	22,50—27,00	11,50—14,00	—	—	—	—	0,020	0,030	55	25	9
Э-12Х24Н14С2	⩽ 0,14	1,20—2,20	1,00—2,00	22,00—25,00	13,00—15,00	—	—	—	—	0,020	0,030	60	24	6
Э-10Х25Н13Г2Б	⩽ 0,12	0,40—1,20	1,20—2,50	21,50—26,50	11,50—14,00	—	0,70—1,30, но ⩾ 8 С	—	—	0,020	0,030	60	25	7
Э-10Х28Н12Г2	⩽ 0,12	⩽ 1,00	1,50—3,00	25,00—30,00	11,00—14,00	—	—	—	—	0,020	0,030	65	15	5
Э-03Х15Н9АГ4	⩽ 0,05	⩽ 0,40	3,00—5,50	14,50—16,50	8,50—10,00	—	—	—	0,12—0,20 N	0,020	0,025	60	30	12
Э-10Х20Н9Г6С	0,13	0,50—1,20	4,80—7,00	18,50—21,50	8,50—11,00	—	—	—	—	0,020	0,040	55	25	9
Э-28Х24Н16Г6	0,22—0,35	⩽ 0,50	5,00—7,50	22,50—26,00	14,50—17,00	—	—	—	—	0,020	0,035	60	25	10
Э-02Х19Н15Г4АМ3В2	⩽ 0,04	⩽ 0,30	3,00—5,50	17,50—20,50	14,50—16,50	2,00—3,20	—	—	1,50—2,30 W; 0,15—0,25 N	0,015	0,025	65	30	12
Э-02Х19Н18Г5АМ3	⩽ 0,04	⩽ 0,50	4,00—7,00	17,00—20,50	16,50—19,00	2,50—4,20	—	—	0,15—0,25 N	0,025	0,030	60	30	12
Э-11Х15Н25М6АГ2	0,08—0,14	⩽ 0,70	1,00—2,30	13,50—17,00	23,00—27,00	4,50—7,00	—	—	N ⩽ 0,20	0,020	0,030	60	30	10
Э-09Х15Н25М6Г2Ф	0,06—0,12	⩽ 0,70	1,50—3,00	13,50—17,00	23,00—27,00	4,50—7,00	—	0,90—1,60	—	0,020	0,020	65	30	10
Э-27Х15Н35В3Г2Б2Т	0,22—0,32	⩽ 0,70	1,50—2,50	13,50—16,00	33,00—36,50	—	1,70—2,50	—	2,40—3,50 W; 0,05—0,25 Ti	0,018	0,030	65	20	5
Э-04Х16Н35Г6М7Б	⩽ 0,06	⩽ 0,60	5,00—6,50	14,00—17,00	34,00—36,00	6,00— 7,50	0,80—1,20	—	—	0,020	0,020	60	25	8
Э-06Х25Н40М7Г2	⩽ 0,08	⩽ 0,50	1,50—2,50	23,00—26,00	38,00—41,00	6,20— 8,50	—	—	Ti ⩽ 0,05	0,015	0,025	60	30	12
Э-08Н60Г7М7Т	⩽ 0,10	⩽ 0,30	6,50—8,00	—	58,00—62,00	5,80— 7,50	—	—	0,02—0,12 Ti	0,020	0,025	45	20	10
Э-08Х25Н60М10Г2	⩽ 0,10	⩽ 0,35	1,50—2,50	23,00—26,00	Основа	8,50—11,00	—	—	Ti ⩽ 0,05	0,015	0,020	65	24	12
Э-02Х20Н60М15В3	⩽ 0,04	⩽ 0,80	⩽ 1,00	17,00—22,00	»	13,50—16,50	—	—	2,50—4,20 W; Fe ⩽ 3,00	0,020	0,025	70	15	7

Типы электродов	C	Si	Mn	Cr	Ni
Э-04Х10Н60М24	≤ 0,06	≤ 0,40	≤ 1,00	8,50—13,00	Основа
Э-08Х14Н65М15В4Г2	≤ 0,10	≤ 0,50	1,50—2,50	12,50—15,50	»
Э-10Х20Н70Г2М2В	≤ 0,14	≤ 0,80	1,20—2,50	18,00—22,00	»
Э-10Х20Н70Г2М2Б2В	≤ 0,14	≤ 1,00	1,20—2,50	18,00—22,00	»

Примечания: 1. Обозначения типов электродов состоят из индекса Э (электроды для дуговой сварки) и следующих за ним цифр и букв. Две цифры, следующие за индексом, указывают среднее содержание углерода в наплавленном металле в сотых долях процента. Химические элементы, содержащиеся в наплавленном металле, обозначены буквами. Цифры, следующие за буквенными обозначениями химических элементов, указывают среднее содержание элемента в процентах. После буквенного обозначения элементов, среднее содержание которых в наплавленном металле составляет менее 1,5%, цифры не проставлены. При среднем содержании в наплавленном металле кремния до 0,8% и марганца до 1,6% буквы С и Г не проставлены.

2. Показатели механических свойств металла шва и наплавленного металла для электродов типов Э-12Х13, Э-16Х17Т, Э-12Х11НМФ, Э-12Х11НВМФ, Э-14Х11НВМФ, Э-10Х16Н4Б, Э-08Х24Н6ТАФМ приведены после термической обработки по режимам,

Продолжение табл. 14

Mo	Nb	V	Прочие элементы	S	P	$\sigma_в$, кгс/мм²	δ_5, %	$a_н$, кгс·м/см²
				не более		не менее		
21,00—26,00	—	—	—	0,025	0,025	60	15	—
13,50—16,00	—	—	3,50—4,50 W	0,018	0,020	55	20	10
1,20—2,70	—	—	0,10—0,30 W	0,015	0,020	—	—	—
1,20—2,70	1,50—3,00	—	0,10—0,30 W	0,015	0,020	65	25	—

регламентированным паспортами или техническими условиями на электроды конкретных марок, а для электродов остальных типов — в состоянии после сварки (без термической обработки).

3. Для электродов типов Э-08Х24Н6ТАФМ и Э-11Х15Н25М6АГ2 определение содержания азота в наплавленном металле не является обязательным.

4. Для электродов типов Э-03Х15Н9АГ4, Э-02Х19Н15Г4АМ3ВГ и Э-02Х19Н18Г5АМ3 приведенные в таблице нормы по содержанию азота являются факультативными.

5. Допускается увеличение содержания углерода на 0,01% для электродов типов Э-07Х19Н11М3Г2Ф, Э-11Х15Н25М6АГ2 и марганца на 0,2% для электродов типа Э-10Х25Н13Г2.

15. Химический состав (%) наплавленного металла и его твердость без термической обра

Типы электродов	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
Э-10Г2	0,08—0,12	≤ 0,15	2,0—3,3	—	—	—
Э-11Г3	0,08—0,13	≤ 0,15	2,8—4,0	—	—	—
Э-12Г4	0,09—0,14	≤ 0,15	3,6—4,5	—	—	—
Э-15Г5	0,12—0,18	≤ 0,15	4,1—5,2	—	—	—
Э-16Г2ХМ	0,12—0,20	0,80—1,30	1,2—2,0	0,9—1,3	—	0,7—0,9
Э-30Г2ХМ	0,22—0,38	≤ 0,15	1,5—2,0	0,5—1,0	—	0,3—0,7
Э-35Г6	0,25—0,45	≤ 0,60	5,5—6,5	—	—	—
Э-37Х9С2	0,25—0,50	1,40—2,80	0,4—1,0	8,0—11,0	—	—
Э-70Х3СМТ	0,50—0,90	0,80—1,20	0,4—1,0	2,3—3,2	—	0,3—0,7
Э-80Х4С	0,70—0,90	1,00—1,50	0,5—1,0	3,5—4,2	—	—
Э-95Х7Г5С	0,80—1,10	1,20—1,80	4,0—5,0	6,0—8,0	—	—
Э-65Х11Н3	0,50—0,80	≤ 0,30	≤ 0,7	10,0—12,0	2,5—3,5	—
Э-24Х12	0,18—0,30	≤ 0,30	0,4—1,0	10,5—13,0	—	—

ботки (без т. о.) или после нее (после т. о.)

W	V	Ti	Прочие элементы	S		P		Твердость *HRC*	
				не более					
				Группа электродов по ГОСТ 9466—75				без т. о.	после т. о.
				1 и 2	3	1 и 2	3		
—	—	—	—	0,030	0,020	0,040	0,035	20—28	—
—	—	—	—	0,030	0,020	0,040	0,035	28—35	—
—	—	—	—	0,030	0,020	0,040	0,035	35—40	—
—	—	—	—	0,030	0,020	0,040	0,035	40—44	—
—	—	—	—	0,030	0,020	0,035	0,030	35—39	—
—	—	—	—	0,030	0,020	0,040	0,035	31—41	—
—	—	—	—	0,030	0,020	0,040	0,035	50—57	—
—	—	—	—	0,030	0,020	0,035	0,030	52—58	—
—	—	≤ 0,30	—	0,030	0,020	0,035	0,030	—	52—60
—	—	—	—	0,030	0,020	0,035	0,030	56—62	—
—	—	—	—	0,030	0,020	0,040	0,035	25—32	—
—	—	—	—	0,030	0,020	0,035	0,030	25—33	—
—	—	—	—	0,030	0,020	0,035	0,030	40—48	—

Продолжение табл. 15

Типы электродов	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V	Ti	Прочие элементы	S не более		P не более		Твердость HRC	
											Группа электродов по ГОСТ 9466—75				без т. о.	после т. о.
											1 и 2	3	1 и 2	3		
Э-20Х13	0,15—0,25	⩽ 0,70	⩽ 0,8	12,0—14,0	⩽ 0,6	—	—	—	—	—	0,030	0,020	0,035	0,030	—	33—48
Э-35Х12Г2С2	0,25—0,45	1,50—2,50	1,6—2,4	10,5—13,5	—	—	—	—	—	—	0,030	0,020	0,035	0,030	—	54—62
Э-35Х12В3СФ	0,25—0,45	1,00—1,60	⩽ 0,5	10,5—13,5	—	—	2,5—3,5	0,5—1,0	—	—	0,030	0,020	0,035	0,030	—	50—58
Э-100Х12М	0,85—1,15	⩽ 0,50	⩽ 0,5	11,0—13,0	—	0,4—0,6	—	—	—	—	0,030	0,020	0,035	0,030	—	53—60
Э-120Х12Г2СФ	1,00—1,40	1,00—1,70	1,6—2,4	10,5—13,5	—	—	—	1,0—1,5	—	—	0,030	0,020	0,035	0,030	—	54—62
Э-300Х28Н4С4	2,50—3,40	2,80—4,20	⩽ 1,0	25,0—31,0	3,0—5,0	—	—	—	—	—	0,035	0,025	0,040	0,035	48—54	—
Э-320Х23С2ГТР	2,90—3,50	2,00—2,50	1,0—1,5	22,0—24,0	—	—	—	—	0,5—1,5	0,5—1,5 В	0,035	0,025	0,040	0,035	55—62	—
Э-320Х25С2ГР	2,90—3,50	2,00—2,50	1,0—1,5	22,0—27,0	—	—	—	—	—	0,5—1,5 В	0,035	0,025	0,040	0,035	57—63	—
Э-350Х26Г2Р2СТ	3,10—3,90	0,60—1,20	1,5—2,5	23,0—29,0	—	—	—	—	0,2—0,4	1,8—2,5 В	0,035	0,025	0,040	0,035	58—63	—
Э-225Х10Г10С	2,00—2,50	0,50—1,50	8,0—12,0	8,0—12,0	—	—	—	—	—	—	0,035	0,025	0,040	0,035	40—50	—
Э-08Х17Н8С6Г	0,05—0,12	4,80—6,40	1,0—2,0	15,0—18,4	7,0— 9,0	—	—	—	—	—	0,025	0,020	0,030	0,030	—	28—37
Э-09Х16Н9С5Г2М2ФТ	0,06—0,12	4,50—5,30	1,6—2,4	15,0—16,8	8,4— 9,2	1,8—2,3	—	0,5—0,9	0,1—0,3	—	0,030	0,020	0,035	0,030	—	29—34
Э-09Х31Н8АМ2	0,06—0,12	⩽ 0,50	⩽ 0,5	30,0—33,0	7,0— 9,0	1,8—2,4	—	—	—	0,3—0,4 N	0,030	0,020	0,035	0,030	—	40—48
Э-13Х16Н8М5С5Г4Б	0,08—0,18	3,80—5,20	3,0—5,0	14,0—19,0	6,5—10,5	3,5—7,0	—	—	—	0,5—1,2 Nb	0,025	0,020	0,030	0,030	—	38—50
Э-15Х15Н10С5М3Г	0,10—0,20	4,80—5,80	1,0—2,0	13,0—17,0	9,0—11,0	2,3—4,5	—	—	—	—	0,030	0,020	0,035	0,030	35—45	—
Э-15Х28Н10С3ГТ	0,10—0,20	2,80—3,80	1,0—2,0	25,0—30,0	9,0—11,0	—	—	—	0,1—0,6	—	0,030	0,020	0,035	0,030	—	35—40
Э-15Х28Н10С3М2ГТ	0,10—0,20	2,50—3,50	1,0—2,0	25,0—30,0	9,0—11,0	1,0—2,5	—	—	0,1—0,3	—	0,030	0,020	0,035	0,030	—	40—45
Э-200Х29Н6Г2	1,60—2,40	0,30—0,60	1,5—3,0	26,0—32,0	5,0— 8,0	—	—	—	—	—	0,035	0,025	0,040	0,035	40—50	—
Э-30В8Х3	0,20—0,40	⩽ 0,30	⩽ 0,4	2,0—3,5	—	—	7,0— 9,0	—	—	—	0,035	0,025	0,040	0,035	—	40—50
Э-80В18Х4Ф	0,70—0,90	⩽ 0,50	⩽ 0,8	3,8—4,5	—	—	17,0—19,5	1,0—1,4	—	—	0,035	0,025	0,040	0,035	—	57—62
Э-90В10Х5Ф2	0,80—1,00	⩽ 0,40	⩽ 0,4	4,0—5,0	—	—	8,5—10,5	2,0—2,6	—	—	0,035	0,025	0,040	0,035	—	57—62
Э-30Х5В2Г2СМ	0,20—0,40	1,00—1,50	1,3—1,8	4,5—5,5	—	0,4—0,6	1,5— 2,5	—	—	—	0,030	0,020	0,035	0,030	50—60	—
Э-65Х25Г13Н3	0,50—0,80	⩽ 0,80	11,0—14,0	2,2—28,5	2,0—3,5	—	—	—	—	—	0,035	0,025	0,040	0,035	23—35	—
Э-105В6Х5М3Ф3	0,90—1,20	⩽ 0,40	⩽ 0,5	4,0—5,5	—	2,5— 4,0	5,0—6,5	2,0—3,0	—	—	0,035	0,025	0,040	0,035	—	60—64
Э-90Х4М4ВФ	0,60—1,20	⩽ 0,80	⩽ 0,7	2,8—4,3	—	2,4— 4,6	0,9—1,7	0,6—1,3	—	—	0,030	0,020	0,035	0,030	—	58—63
Э-10М9Н8К8Х2СФ	0,08—0,12	1,20—1,80	0,6—1,2	2,0—2,6	6,5—9,5	7,0—11,0	—	0,3—0,7	—	6,5— 9,5 Co	0,030	0,020	0,035	0,030	—	55—60
Э-10К15В7М5Х3СФ	0,08—0,12	0,80—1,60	0,3—0,7	2,0—4,2	—	3,8— 6,2	5,0— 8,0	0,5—1,1	—	12,7—16,3 Co	0,030	0,020	0,035	0,030	—	52—58
Э-10К18В11М10Х3СФ	0,8 —0,12	0,80—1,60	0,3—0,7	1,8—3,2	—	7,8—11,2	8,8—12,2	0,4—0,8	—	15,7—19,3 Co	0,030	0,020	0,035	0,030	—	62—66
Э-110Х14В13Ф2	0,90—1,30	0,30—0,60	0,5—0,8	12,0—16,0	—	—	11,0—15,0	1,4—2,0	—	—	0,035	0,025	0,040	0,035	50—55	—
Э-175Б8Х6СТ	1,60—1,90	0,70—1,50	0,6—1,2	5,0—6,0	—	—	—	—	⩽ 0,4	7,0— 8,0 Nb	0,030	0,020	0,035	0,030	52—57	—
Э-190К62Х29В5С2	1,60—2,20	1,50—2,60	—	25,0—32,0	—	—	4,0—5,0	—	—	59,0—65,0 Co	0,035	0,025	0,040	0,035	40—50	—

Примечания: 1. Обозначения типов электродов состоят из индекса Э (электроды для ручной дуговой сварки и наплавки) и следующих за ним цифр и букв. Две или три цифры, следующие за индексом, указывают среднее содержание углерода в наплавленном металле в сотых долях процента. Химические элементы, содержащиеся в наплавленном металле, обозначены буквами. Цифры, следующие за буквенными обозначениями химических элементов, указывают среднее содержание элемента в процентах. После буквенного обозначения химических элементов, среднее содержание которых в наплавленном металле составляет не более 1,5%, цифры не проставлены. При среднем содержании в наплавлением металле кремния до 0,8% и марганца до 1,0% буквы С и Г не проставлены.

2. Вид и режимы термической обработки наплавленного металла должны соответствовать указанным в паспортах или технических условнях на электроды конкретиых марок.

3. Твердость наплавленного металла после термической обработки для электродов типов Э-10Г2, Э-11Г3, Э-12Г4, Э-15Г5, Э-16Г2ХМ, Э-30Г2ХМ, Э-35Г6, Э-37Х9С2, Э-80Х4С, Э-95Х7Г5С, Э-65Х11Н3, Э-24Х12, Э-300Х28Н4С4, Э-320Х23С2ГТР, Э-320Х25С2ГР, Э-350Х26Г2Р2СТ, Э-225Х10Г10С, Э-15Х15Н10С5М3Г, Э-200Х29Н6Г2, Э-30Х5В2Г2СМ, Э-65Х25Г13Н3, Э-110Х14В13Ф2, Э-175Б8Х6СТ, Э-190К62Х29В5С2 должна соответствовать требованиям паспортов или технических условий на электроды конкретных марок.

4. Твердость наплавленного металла без термической обработки после наплавки для электродов типов Э-70Х3СМТ, Э-20Х13, Э-35Х12Г2С2, Э-35Х12В3СФ, Э-100Х12М, Э-120Х12Г2СФ, Э-08Х17Н8С6Г, Э-09Х16Н9С5Г2М2ФТ, Э-09Х31Н8АМ2, Э-13Х16Н8М5С5Г4Б, Э-15Х28Н10С3ГТ, Э-15Х28Н10С3М2ГТ, Э-30В8Х3, Э-80В18Х4Ф, Э-90В10Х5Ф2, Э-105В6Х5М3Ф3, Э-90Х4М4ВФ, Э-10М9Н8К8Х2СФ, Э-10К15В7М5Х3СФ Э-10К18В11М10Х3СФ должна соответствовать требованиям паспортов или технических условий на электроды конкретных марок.

Содержание ферритной фазы в наплавленном металле должно соответствовать приведенному ниже:

Типы электродов	Содержание ферритной фазы в наплавленном металле, %	Типы электродов	Содержание ферритной фазы в наплавленном металле, %
Э-02Х20Н14Г2М2, Э-02Х19Н9Б	0,5—4,0	Э-09Х19Н10Г2М2Б,	2,0— 8,0
Э-08Х16Н8М2	2,0—4,0	Э-08Х19Н9Ф2Г2СМ,	
Э-06Х19Н11Г2М2,	2,0—5,5	Э-09Х16Н8Г3М3Ф, Э-10Х25Н13Г2,	
Э-08Х19Н10Г2Б,		Э-12Х24Н14С2,	2,0—10,0
Э-09Х19Н11Г3М2Ф		Э-10Х25Н13Г2Б	
Э-07Х20Н9, Э-08Х19Н10Г2МБ,	2,0—8,0	Э-04Х20Н9, Э-02Х21Н10Г2	4,0—10,0
Э-07Х19Н11М3Г2Ф		Э-08Х19Н9Ф2С2	5,0—15,0
Э-08Х17Н8М2, Э-08Х20Н9Г2Б,		Э-06Х22Н9, Э-10Х28Н12Г2	10,0—20,0

Приведенные выше нормы химического состава наплавленного металла и содержания в нем ферритной фазы, а также механических свойств металла шва и наплавленного металла должны быть проверены при испытании электродов в соответствии с требованиями ГОСТ 9466—75.

Для электродов диаметром менее 3 мм при испытании механических свойств сварного соединения временное сопротивление сварного соединения разрыву должно соответствовать временному сопротивлению разрыву металла шва и наплавленного металла, указанному в табл. 14, а угол загиба — указанному в паспорте или технических условиях на конкретную марку электродов.

Испытания наплавленного металла на межкристаллитную коррозию следует проводить по ГОСТ 6032—75 или по специальной методике, оговоренной в паспорте или технических условиях на электроды конкретной марки.

Условное обозначение электродов для дуговой сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами — по ГОСТ 9466—75. При этом во второй строке условного обозначения электродов группа индексов, указывающих характеристики наплавленного металла и металла шва, должна состоять из четырех цифровых индексов для электродов, обеспечивающих аустенитно-ферритную структуру наплавленного металла, и из трех цифровых индексов — для остальных электродов.

Первый индекс характеризует стойкость наплавленного металла и металла шва к межкристаллитной коррозии:

Испытание	Индекс
Данные отсутствуют	0
По специальной методике	1
По методу (ГОСТ 6032—75):	
АМ или АМУ	2
Б	3
В или ВУ	4
ДУ	5

Второй индекс указывает максимальную рабочую температуру, при которой регламентированы показатели длительной прочности наплавленного металла и металла шва:

Максимальная рабочая температура,°С	Индекс	Максимальная рабочая температура,°С	Индекс
Данные отсутствуют	0	660—700	5
До 500	1	710—750	6
510—550	2	760—800	7
560—600	3	810—850	8
610—650	4	Св. 850	9

Третий индекс указывает максимальную рабочую температуру сварных соединений, до которой допускается применение электродов при сварке жаростойких сталей:

Максимальная рабочая температура, °С	Индекс	Максимальная рабочая температура, °С	Индекс
Данные отсутствуют	0	760—800	5
До 600	1	810—900	6
610—650	2	910—1000	7
660—700	3	1010—1100	8
710—750	4	Св. 1100	9

Четвертый индекс указывает содержание ферритной фазы в наплавленном металле для электродов, обеспечивающих аустенитно-ферритную структуру наплавленного металла:

Содержание ферритной фазы, %	Индекс	Содержание ферритной фазы, %	Индекс
Не нормируется	0	2,0—10,0	5
0,5—4,0	1	4,0—10,0	6
2,0—4,0	2	5,0—15,0	7
2,0—5,5	3	10,0—20,0	8
2,0—8,0	4		

Все данные, необходимые для составления группы индексов, должны быть взяты из паспортов или технических условий на электроды конкретных марок.

Примеры составления групп индексов, указывающих характеристики наплавленного металла и металла шва, для условного обозначения электродов. Электроды марки ЦЛ-41 (типа Э-06Х13Н); данные по стойкости наплавленного металла и металла шва к межкристаллитной коррозии, а также по их длительной прочности и жаростойкости в паспорте отсутствуют (0):

000

Электроды марки ЦЛ-9 (типа Э-10Х25Н13Г2Б); наплавленный металл и металл шва не склонны к межкристаллитной коррозии при испытании по методу АМ ГОСТ 6032—75 (2); данные по длительной прочности в паспорте отсутствуют (0); при сварке жаростойких сталей могут быть применены для выполнения сварных соединений, работающих при температуре до 1000° С (7); содержание ферритной фазы в наплавленном металле 3,0—10,0% (5):

2075

ТИПЫ ПОКРЫТЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ С ОСОБЫМИ СВОЙСТВАМИ

ГОСТ 10051—75 устанавливает 44 типа покрытых металлических электродов для ручной дуговой наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами. Стандарт не распространяется на электроды для наплавки слоев из цветных металлов.

Типы электродов, химический состав наплавленного металла и его твердость при нормальной температуре должны соответствовать указанным в табл. 15. Проверка твердости наплавленного металла — по ГОСТ 9466—75 и ГОСТ 9013—59. Проверка химического состава наплавленного металла и остальные требования — по ГОСТ 9466—75.

Условное обозначение электродов — по ГОСТ 9466—75. При этом группа индексов, указывающих характеристики наплавленного металла, должна состоять из двух индексов.

Первый индекс указывает среднюю твердость наплавленного металла (табл. 16).

Второй индекс указывает, что твердость наплавленного металла обеспечивается без термической обработки после наплавки — 1 или после термической обработки — 2.

16. Твердость наплавленного металла

HV	*HRC*	Индекс*	*HV*	*HRC*	Индекс*
175–224	13–21	200/17	675–724	58	700/58
225–274	22–28	250/25	725–774	59–60	750/60
275–324	29–35	300/32	775–824	61	800/61
325–374	36–38	350/37	825–874	62–63	850/62
375–424	39–43	400/41	875–924	64	900/64
425–474	44–47	450/45	925–974	65	950/65
475–524	48	500/48	975–1024	66–67	1000/66
525–574	49–51	550/50	1025–1074	68	1050/68
575–624	52–54	600/53	1075–1124	69	1100/69
625–674	55–57	650/56	1125–1174	70–71	1150/70

* Слева от косой черты указывают среднюю твердость наплавленного металла по Виккерсу, справа от косой черты — по Роквеллу.

Если паспорт или технические условия на электроды конкретной марки устанавливают твердость наплавленного металла как без термической обработки после наплавки, так и после термической обработки, или после термической обработки по различным режимам, то группа индексов дополняется соответствующими парами индексов, указываемыми в скобках.

Данные, необходимые для составления указанных групп индексов, должны быть взяты из табл. 15 и паспортов или технических условий на электроды конкретных марок.

Пример составления группы индексов, указывающих в обозначении электродов характеристики наплавленного металла. Электроды марки ОЗН-300У типа Э-11Г3, обеспечивающие среднюю твердость наплавленного металла *НВ* 300 (*HRC* 32; $HV \approx 300$) без термической обработки после наплавки:

300/32—1

ГОСТ 10051—75 имеет справочное приложение, в котором указаны наиболее распространенные марки электродов для наплавки и основные области их применения (табл. 17).

17. Электроды для наплавки

Тип электродов	Марка электродов	Наплавка
Э-10Г2 Э-11Г3 Э-12Г4 Э-15Г5 Э-30Г2ХМ	ОЗН-250У ОЗН-300У ОЗН-350У ОЗН-400У НР-70	Деталей, работающих в условиях интенсивных ударных нагрузок (осей, валов, автосцепок, железнодорожных крестовин, рельсов и др.)
Э-16Г2ХМ Э-35Г6 Э-30В8Х3 Э-35Х12В3СФ Э-90Х4М4ВФ	ОЗШ-1 ЦН-4 ЦШ-1 Ш-16 ОЗИ-3	Штампов для горячей штамповки
Э-37Х9С2 Э-70Х3СМТ Э-24Х12 Э-20Х13 Э-35Х12Г2С2 Э-100Х12М Э-120Х12Г2СФ Э-10М9Н8К8Х2СФ	ОЗШ-3 ЭН-60М ЦН-5 48Ж-1 НЖ-3 ЭН-Х12М Ш-1 ОЗШ-4	Штампов для холодной штамповки

Продолжение табл. 17.

Тип электродов	Марка электродов	Наплавка
Э-65Х11Н3 Э-65Х25Г13Н3	ОМГ-Н ЦНИИН-4	Изношенных деталей из высокомарганцовистых сталей марок 110Г13 и 110Г13Л
Э-80В18Х4Ф Э-90В10Х5Ф2 Э-105В6Х5М2Ф3 Э-10К15В7М5Х3СФ Э-10К18В11М10Х3СФ	ЦИ-1М ЦИ-2У И-1 ОЗИ-4 ОЗИ-5	Металлорежущего инструмента, а также штампов для горячей штамповки в тяжелых условиях (осадка, вытяжка, прошивка)
Э-95Х7Г5С Э-30Х5В2Г2СМ	12АН/ЛИВТ ТКЗ-Н	Деталей, работающих в условиях интенсивных ударных нагрузок с абразивным изнашиванием
Э-80Х4С Э-320Х23С2ГТР Э-320Х25С2ГР Э-350Х26Г2Р2СТ	13КН/ЛИВТ Т-620 Т-590 Х-5	Деталей, работающих в условиях преимущественно абразивного изнашивания
Э-300Х28Н4С4 Э-225Х10Г10С Э-110Х14В13Ф2 Э-175Б8Х6СТ	ЦС-1 ЦН-11 ВСН-6 ЦН-16	Деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания с ударными нагрузками
Э-08Х17Н8С6Г Э-09Х16Н9С5Г2М2ФТ Э-09Х31Н8АМ2 Э-13Х16Н8М5С5Г4Б Э-15Х15Н10С5М3Г Э-15Х28Н10С3ГТ Э-15Х28Н10С3М2ГТ Э-200Х29Н6Г2 Э-190К62Х29В5С2	ЦН-6М, ЦН-6Л ВПИ-1 УОНИ-13/Н1-БК ЦН-12М, ЦН-12Л ЦН-18 ЦН-19 ЦН-20 ЦН-3 ЦН-2	Уплотнительных поверхностей арматуры для котлов, трубопроводов и нефтеаппаратуры

НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЕННЫЕ МАРКИ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ СВАРКИ СТАЛЕЙ

Наиболее распространенные марки покрытых электродов для ручной дуговой сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей с указанием типа электродов по ГОСТ 9467—75 приведены в табл. 18.

18. Марки электродов для сварки конструкционных и теплоустойчивых сталей

Марка электродов	Тип электродов по ГОСТ 9467—75	Марка электродов	Тип электродов по ГОСТ 9467—75
АНІ	Э38	ВИ-10-6, У-340/105, ЦЛ-19	Э100
АНО-1, АНО-5, АНО-6, СМ-5	Э42	НИАТ-3М	Э125
ЦМ-9, АНО-4, ОЗС-12, МР-3	Э46	НИАТ-3	Э150
ВСН-3, ВСЦ-3	Э50	УОНИИ-13/45М	Э-09М
УОНИИ-13/45, СМ-11, ОЗС-2, УП-2/45	Э42А	УОНИИ-13/45МХ, ЦУ-2МХ, ЦЛ-14	Э-09МХ
ИТС-1, (УОНИИ-13/45)	Э46А	ЦУ-2ХМ, ЦЛ-38, Н-3	Э-09Х1М
УОНИИ-13/55, АНО-9, УП-2/55, ЦУ-1	Э50А	Н-10	Э-05Х2М
УОНИИ-13/55У	Э55	ЦЛ-55	Э-09Х2М1
УОНИИ-13/65	Э60	ЦЛ-20, Н-6	Э-09Х1МФ
Н-1, ЛКЗ-70	Э70	ЦЛ-36	Э-10Х1М1НФБ
УОНИИ-13/85, ЦЛ-18	Э85	ЦЛ-26М	Э-10Х3М1БФ
		ЦЛ-17	Э-10Х5МФ

Наиболее распространенные марки покрытых электродов для ручной дуговой сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами с указанием типа электродов по ГОСТ 10052—75 приведены в табл. 19.

19. Марки электродов для сварки высоколегированных сталей

Марка электродов	Тип электродов по ГОСТ 10052—75	Марка электродов	Тип электродов по ГОСТ 10052—75
УОНИИ/10Х13	Э-12Х13	ЭА-606/10	Э-08Х19Н9Ф2Г2СМ
ЦЛ-41	Э-06Х13Н	ЦТ-1	Э-09Х16Н8Г3М3Ф
УОНИИ/10Х17	Э-10Х17Т	КТИ-5	Э-09Х19Н11Г3М2Ф
КТИ-9	Э-12Х11НМФ	ЭА-400/10Т, ЦТ-7	Э-07Х19Н11М3Г2Ф
КТИ-10	Э-12Х11НВМФ	М22	Э-08Х24Н12Г3СТ
ЦЛ-32	Э-14Х11НВМФ	ЗиО-8, ЦЛ-25	Э-10Х25Н13Г2
УОНИИ-13/ЭП-56	Э-10Х16Н4Б	ОЗЛ-5, ЦТ-17	Э-12Х24Н14С2
08Х25Н5ТМФ/48	Э-08Х24Н6ТАФМ	ЦЛ-9	Э-10Х25Н13Г2Б
ОЗЛ-14	Э-04Х20Н9	АНВ-24	Э-03Х15Н9АГ4
ОЗЛ-8, ОЗЛ-14-1	Э-07Х20Н9	ЭА-478/3, СЛ-16	Э-10Х20Н9Г6С
ОЗЛ-22	Э-02Х21Н10Г2	ОЗЛ-9, ОЗЛ-9А	Э-28Х24Н16Г6
ЦЛ-33	Э-06Х22Н9	АНВ-20	Э-02Х19Н15Г4АМ3В2
ЦТ-26	Э-08Х16Н8М2	АНВ-17	Э-02Х19Н18Г5АМ3
ЦТ-26-1	Э-08Х17Н8М2	ЭА-395/9, ЦТ-10, НИАТ-5	Э-11Х15Н25М6АГ2
ЦЛ-4, НИАТ-1, ЭНТУ-3М	Э-06Х19Н11Г2М2	ЭА-981/15	Э-09Х15Н25М6Г2Ф
ОЗЛ-20	Э-02Х20Н14Г2М2	КТИ-7	Э-27Х15Н35В3Г2Б2Т
АНВ-13	Э-02Х19Н9Б	ЭА-855/51	Э-04Х16Н35Г6М7Б
ЦТ-15, ЗИО-3	Э-08Х19Н10Г2Б	АНЖР-2	Э-06Х25Н40М7Г2
ЦЛ-11, ЦТ-15-1, ОЗЛ-7	Э-08Х20Н9Г2Б	ЦТ-36	Э-08Н60Г7М7Т
ОЗЛ-3, ОЗЛ-29	Э-10Х17Н13С4	АНЖР-1	Э-08Х25Н60М10Г2
ЭА-898/21Б	Э-08Х19Н10Г2МБ	ОЗЛ-21	Э-02Х20Н60М15В3
ЭА-400/13, ЭА-902/14, СЛ-28	Э-09Х19Н10Г2М2Б	НМЕТ-10	Э-04Х10Н60М24
ЭА-606/11, ГЛ-2	Э-08Х19Н9Ф2С2	ЦТ-28	Э-08Х14Н65М15В4Г2
		ОЗЛ-25	Э-10Х20Н70Г2М2В
		ОЗЛ-25Б	Э-10Х20Н70Г2М2Б2В

Наиболее распространенные марки покрытых электродов для ручной дуговой наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами с указанием типа электродов по ГОСТ 10051—75 приведены выше (см. табл. 17).

Электроды конкретных марок для сварки и наплавки конструкций должны выбирать квалифицированные специалисты по сварке с учетом всех требований, предъявляемых к выполняемым сварным соединениям и наплавленным поверхностям. При этом следует иметь в виду, что в некоторых случаях электроды различных марок, соответствующих одному типу, не являются взаимозаменяемыми.

ПОКРЫТЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ ЧУГУНА И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Требования к покрытым электродам для ручной дуговой сварки чугуна и цветных металлов (алюминия, меди и их сплавов) государственными стандартами не регламентированы, и все указанные электроды изготовляют по паспортам или техническим условиям на электроды конкретных марок.

Для сварки чугуна наиболее часто используют электроды марок ОМЧ-1, ВЧ-3, МНЧ-1, МНЧ-2, ЦЧ-3А и ЦЧ-4.

Для сварки алюминия и его сплавов широко распространены электроды марок ОЗА-1, ОЗА-2 и А2.

Для сварки меди и ее сплавов наиболее распространены электроды марок «Комсомолец-100», МН-5 и ОЗБ-1.

ПРОИЗВОДСТВО ПОКРЫТЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

При изготовлении электродов используют стержни из сварочной проволоки по соответствующим стандартам или техническим условиям и компоненты покрытия, наиболее распространенные из которых указаны в табл. 20.

20. Наиболее распространенные компоненты покрытия электродов

Компонент	Стандарт или технические условия	Марка
Неметаллические компоненты		
Гематит (руда железная)	—	Класс 10 (Криворожского месторождения) $1/1Т_1$; $1/1Т_2$
Глина формовочная монтмориллонитовая (бентонитовая)	ГОСТ 3226—77	ГН-1
Глинозем	ГОСТ 6912—74	ГЛ-1; ГЛ-2; ГЛ-3
Графит кристаллический (литейный)	ГОСТ 5279—74	ТЭ
Двуокись титана электродная	ТУ 6-10-1363—73	
Калий:		
двухромовокислый (бихромат калия) технический	ГОСТ 2652—71	—
углекислый технический (поташ)	ГОСТ 10690—73	—
Каолин	ГОСТ 21286—75	Сорт 1
Карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ)	ГОСТ 5.588—70, МРТУ 6-05-1287—70	75/400; 85/500
Концентрат:		
марганцевый для покрытых электродов	ГОСТ 4418—75	—
плавиково-шпатовый для сварочных материалов	ГОСТ 4421—73	ФФС-97А; ФФС-97Б; ФКС-95А; ФКС-95Б; ФФС-95
рутиловый	ТУ 48-4-172—72	—
Криолит искусственный технический	ГОСТ 10561—73	К-1; К-2
Магнезит сырой дробленый	ТУ 14-8-64—73	СМ-1; СМ-2 (Саткинской группы месторождений)
Мрамор для сварочных материалов	ГОСТ 4416—73	М-97И; М-97К; М-97Б
Песок кварцевый	ГОСТ 4417—75	—
Силикат растворимый:		
калиево-натриевый	ТУ 21-01-267—69	—
натриево-калиевый	ТУ 21-01-478—71	—
натрия	ГОСТ 13079—67	—
Слюда мусковит молотая электродная	ГОСТ 14327—69	—
Сода кальцинированная (техническая)	ГОСТ 5100—73	Сорт 1 и 2
Стекло натриевое жидкое	ГОСТ 13078—67	—
Тальк молотый	ГОСТ 21235—75	А и Б, сорт 1
Целлюлоза электродная	ТУ 81/БВ-04 171—69	ЭЦ
Шпат полевой для электродных покрытий	ГОСТ 4422—73	—
Металлические компоненты		
Марганец металлический	ГОСТ 6008—75	Мр00; Мр0
Порошок:		
алюминиевый	—	—
железный	ГОСТ 9849—74	ПЖ0; ПЖ1; ПЖ2
кобальтовый	ГОСТ 9721—71	ПК-1; ПК-2
никелевый	ГОСТ 9722—71	ПНК1Л5
Пудра алюминиевая	ГОСТ 5494—71	ПАП-2
Феррованадий	ТУ 14-5-98-78	ФВд35А, ФВд35В
Ферровольфрам	ГОСТ 17293—71	В1а; В1
Ферромарганец:		
мало- и среднеуглеродистый	ГОСТ 4755—70	ФМн0,5; ФМн1,0А; ФМн1,0; ФМн1,5
доменный	ГОСТ 5165—49	Мн5; Мн6
Ферромолибден	ГОСТ 4759—69	ФМ1; ФМ2

Продолжение табл. 20.

Компонент	Стандарт или технические условия	Марка
Металлические компоненты		
Феррониобий	ГОСТ 16773—71	ФН0; ФН1
Ферросилиций	ГОСТ 1415—70	ФС45
Ферротитан	ГОСТ 4761—67	Ти0; Ти1
Феррохром	ГОСТ 4757—67	ФХ100Н; ФХ400Н; ФХ100; ФХ200; ФХ650; ФХ800
Хром металлический	ГОСТ 5905—67	Х0; Х1; Х2

Принципиальный технологический процесс изготовления покрытых электродов методом опрессовки состоит из следующих операций:

изготовление электродных стержней пугем правки и рубки сварочной проволоки на правильно-рубильных станках;

переработка твердых компонентов покрытия для обеспечения заданного гранулометрического состава и других предъявляемых к ним требований (промывка, дробление, сушка, измельчение, просев, пассивирование и другие операции, выполняемые в зависимости от вида и состояния поставки компонентов);

приготовление жидкого стекла (промывка и дробление силикатной глыбы, ее варка в воде и охлаждение раствора с последующим фильтрованием или отстаиванием);

приготовление сухой шихты (взвешивание компонентов по заданной рецептуре и их последующее перемешивание в сухом виде);

приготовление обмазочной массы (добавление в сухую шихту заданного количества жидкого стекла и пластификаторов, перемешивание мокрой смеси и ее последующее брикетирование);

изготовление покрытых электродов на электродообмазывающем прессе с зачистной машиной;

сушка и прокалка покрытых электродов;

упаковка электродов;

контроль качества готовых электродов.

Глава 3
МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ГАЗОПЛАМЕННОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

В качестве горючих газов при газопламенной обработке металлов применяют различные горючие газы, имеющие низшую теплоту сгорания не менее 4000 ккал/м³ (исключением является водород, низшая теплота сгорания которого 2400 ккал/м³). В качестве окислителя используют кислород.

СВОЙСТВА ГАЗООБРАЗНОГО И ЖИДКОГО КИСЛОРОДА

Кислород при нормальных условиях — газ без цвета, запаха и вкуса. Плотность кислорода 1,43 кг/м³ при 0° С и давлении 760 мм рт. ст. При охлаждении до —182,97° С при 760 мм рт. ст. кислород превращается в голубоватую жидкость без запаха.

Кислород активно поддерживает процесс горения. При соприкосновении сжатого кислорода, находящегося под давлением свыше 30 кгс/см², с маслами и жирами происходит их мгновенное окисление, сопровождающееся выделением теплоты, в результате чего масло или жир могут воспламениться. При определенных условиях воспламенение может привести к взрыву. При работе с кислородом необходимо следить, чтобы аппаратура, баллоны и одежда обслуживающего персонала не имели следов масел и жиров. В случае обнаружения засаленных поверхностей категорически запрещается использовать загрязненное оборудование при работе с кислородом. Жидкий кислород при попадании на кожу вызывает обмораживание ткани.

Кислород может быть получен химическим способом, а также электролизом воды или воздуха методом глубокого охлаждения. При промышленном способе получения кислорода воздух, очищенный от механических примесей, углекислоты и влаги, сжимается в компрессорах, охлаждается до сжижения и разделяется на азот и кислород. Азот в ректификационных установках испаряется и отводится в окружающую среду, а жидкий кислород, имеющий температуру кипения выше, чем температура кипения жидкого азота, остается — накапливается в жидком виде [5].

Кислород газообразный технический, согласно ГОСТ 5583—68, выпускается трех сортов, отличающихся количеством допустимых примесей (азота и аргона). Наивысшей чистотой обладает кислород первого сорта; его чистота должна быть не ниже 99,7% (по объему); кислород второго и третьего сортов соответственно должен иметь чистоту не ниже 99,5% и 99,2%. Содержание влаги в газообразном кислороде не должно превышать 0,07 г/м³. Кислород жидкий технический, согласно ГОСТ 6331—68, в зависимости от содержания кислорода и его примесей выпускается также трех сортов.

Для неответственных видов газовой сварки, пайки, поверхностной закалки и других видов нагрева газовым пламенем может быть использован кислород чистотой 92—98%, получаемый в специальных установках для металлургического производства, а также как побочный продукт при производстве азота. Сжатый газообразный кислород хранится и транспортируется в пустотелых баллонах по ГОСТ 949—73. Количество сжатого кислорода в баллонах может быть 8 кг, или 6 м³; оно равно произведению емкости баллона в дм³ на давление в баллоне в кгс/см²,

определенное по манометру. Допустимое давление кислорода в баллонах зависит от температуры окружающей среды:

Температура, °С . .	—50	—40	—30	—20	—10	0	10	20	30	40	50
Давление в баллоне, кгс/см² . .	99	107	124	129,5	134,5	139,5	145	150	155	160	172

Жидкий кислород хранят и транспортируют в специальных сосудах — танках. При газопламенной обработке жидкий кислород предварительно испаряют и подают к месту работ в газообразном состоянии при давлении до 16 кгс/см². Кислородопроводы в зависимости от допустимого максимального давления делятся на четыре категории, для которых рабочие давления соответственно равны (кгс/см²): 16 — IV; св. 16 до 25 — III; св. 25 до 64 — II; св. 64 до 200 — I [13]. При перевозке жидкого кислорода масса тары, приходящаяся на 1 кг кислорода, уменьшается по сравнению с массой тары при перевозке газообразного кислорода более чем в 10 раз. В газообразном кислороде, получаемом испарением жидкого кислорода, влага отсутствует. Смеси кислорода с горючими газами взрывоопасны. Пределы взрываемости для смеси горючих газов с кислородом выше пределов взрываемости тех же газов с воздухом.

СВОЙСТВА ГОРЮЧИХ ГАЗОВ

Для газопламенных работ необходимо осуществить передачу тепла из пламени в металл в количестве, достаточном для конкретных условий работ. Горючие газы сгорают, как правило, в смеси с кислородом. Наибольшей температурой обладает ацетилено-кислородное пламя (3200° С), что позволяет использовать ацетилен при любых видах газопламенной обработки металлов. Интенсивность горения пламени определяется произведением нормальной скорости горения на теплоту сгорания смеси. Ацетилен обладает наивысшей «интенсивностью горения», которая для смеси стехиометрического состава составляет 27 700 ккал/(м²·с).

Ацетилен. Ацетилен относится к группе непредельных углеводородов ряда C_nH_{2n-2} [4, 6, 10, 12]. Это бесцветный горючий газ со специфическим запахом; благодаря наличию в нем примесей — фосфористого водорода, сероводорода и пр. плотность ацетилена при 20° С и 760 мм рт. ст. равна 1,091 кг/м³; при 0° С и 760 мм рт. ст. — плотность 1,171 кг/м³. Ацетилен легче воздуха; плотность по сравнению с плотностью воздуха 0,9; молекулярная масса 26,038. Критическая точка для ацетилена характеризуется давлением насыщенного пара, равным 61,65 кгс/см², и температурой 35,54° С. При 760 мм рт. ст. и температуре —84° С ацетилен переходит в жидкое состояние, при температуре —85° С — затвердевает.

Ацетилен — единственный широко используемый в промышленности газ, относящийся к числу немногих соединений, горение и взрыв которых возможны в отсутствии кислорода или других окислителей. Ацетилен высокоэндотермическое соединение; при разложении 1 кг ацетилена выделяется более 2000 ккал, т. е. примерно в 2 раза больше, чем при взрыве 1 кг твердого ВВ тротила. Температура самовоспламенения ацетилена колеблется в пределах 500—600° С при давлении 2 кгс/см² и заметно снижается с увеличением давления; так, при давлении 22 кгс/см² температура самовоспламенения ацетилена равна 350° С, а при наличии катализаторов, таких, как железный порошок, силикагель, активный уголь и др. разложение ацетилена начинается при 280—300° С. Присутствие окиси меди снижает температуру самовоспламенения до 246° С. При определенных условиях ацетилен реагирует с медью, образуя взрывоопасные соединения; поэтому при изготовлении ацетиленового оборудования запрещается применять сплавы, содержащие более 70% Cu.

Взрывчатый распад ацетилена, как правило, начинается при интенсивном нагреве со скоростью 100—500° С/с. При медленном нагреве происходит реакция

полимеризации ацетилена, идущая с выделением тепла, которая, как правило, при температуре свыше 530° С влечет за собой взрывчатый распад ацетилена. Нижнее предельное давление, при котором возможно разложение ацетилена, равно 0,65 кгс/см². Пределы взрываемости для ацетилена широки (см. табл. 2). Наиболее опасными являются смеси ацетилена с кислородом стехиометрического состава (~30%). Скорости распространения пламени и детонации достигают наибольшего значения при соотношении ацетилена и кислорода 1 : 2,5 и соответственно равны 13,5 и 2400 м/с при нормальных условиях. Давление, образующееся при взрыве ацетилена, зависит от начальных параметров и характера взрыва. Оно может возрасти примерно в 10—12 раз по сравнению с начальным при взрыве в небольших сосудах и может быть увеличено в 22 раза при детонации чистого ацетилена и в 50 раз при детонации ацетилено-кислородной смеси.

При газопламенной обработке металлов ацетилен используют либо в газообразном состоянии при получении его в переносных или стационарных ацетиленовых генераторах, либо в растворенном состоянии. Растворенный ацетилен представляет собой раствор ацетилена в ацетоне, распределенный равномерно в пористом наполнителе под давлением. Растворимость ацетилена зависит от температуры и давления. Пористая масса в баллоне обеспечивает рассосредоточение ацетилена по всему объему и локализацию взрывчатого распада ацетилена. При отсутствии пористой массы в баллоне инициированный взрывной распад ацетилена, растворенного в ацетоне, происходит при давлении ниже 5 кгс/см². В качестве пористых наполнителей могут быть использованы не только насыпные пористые массы, но и литые пористые массы, которые нашли применение за рубежом.

Физико-химические показатели газообразного и растворенного технического ацетилена оговорены ГОСТ 5457—75. По содержанию допустимого количества примесей различают ацетилен растворенный (с государственным знаком качества), растворенный и газообразный; допустимое содержание примесей (в объемных долях) соответственно равно: воздуха и других малорастворимых в воде газов — не более 0,9, 1,0, 1,5; фосфористого водорода — 0,01; 0,04; 0,08; сероводорода — 0,005; 0,05; 0,15; водяных паров при 20° С и 760 мм рт. ст. — 0,5; 0,6.

Технический растворенный ацетилен транспортируют в стальных баллонах по ТУ 6-21-32-78. Допустимое максимальное давление в баллонах не должно превышать 13,4 кгс/см² при температуре —5° С и давлении 760 мм рт. ст. и 30 кгс/см² при температуре +40° С и давлении 760 мм рт. ст. Остаточное давление в баллоне при тех же параметрах не должно быть меньше соответственно 0,5 и 3,0 кгс/см².

Для газопламенной обработки металлов, наряду с ацетиленом, полученным из карбида кальция, применяют пиролизный ацетилен, получаемый из природного газа термоокислительным пиролизом метана с кислородом. Пиролизный ацетилен также хранят и транспортируют в баллонах в растворенном виде. Наполнитель и растворитель для пиролизного ацетилена тот же, что и для ацетилена из карбида кальция.

При применении растворенного ацетилена по сравнению с газообразным обеспечиваются наибольший коэффициент использования карбида, чистота рабочего места сварщика, устойчивая работа аппаратуры и безопасность в работе. Основным сырьем для получения ацетилена, используемого при газопламенной обработке металлов, является карбид кальция. Карбид кальция получают в электрических печах при взаимодействии обожженной извести с коксом или антрацитом. Расплавленный карбид кальция разливают в изложницы, где он застывает; затем его дробят в кусковых дробилках и сортируют по размерам кусков согласно ГОСТ 1460—76. Ацетилен получают в результате разложения (гидролиза) карбида кальция водой. Действительный «литраж» ацетилена из 1 кг технического карбида при 20° С и 760 мм рт. ст. не превышает 285 л и зависит от грануляции карбида. С увеличением размеров кусков карбида «литраж» увеличивается, однако скорость разложения его уменьшается, т. е. увеличивается длительность разложения карбида (табл. 1).

1. Физико-химические показатели карбида кальция

Размеры кусков, мм	Обозначение	«Литраж», л/кг, не менее		Размеры кусков, мм	Обозначение	«Литраж», л/кг, не менее	
		Первый сорт	Второй сорт			Первый сорт	Второй сорт
Св. 25 до 80	25/80	285	265	От 2 до 8	2/8	255	240
» 15 » 25	15/25	275	255	Для кусков смешанных размеров		275	255
» 8 » 15	8/15	265	250				

Содержание фосфористого водорода в ацетилене по объему не более 0,08%, содержание сульфидной серы не более 1,2%. В ГОСТ 1460—76 оговаривается также допустимое количество кусков карбида кальция других размеров в партиях указанной грануляции. Большой тепловой эффект реакции разложения карбида создает опасность сильного перегрева. Без отвода тепла при взаимодействии стехиометрического количества карбида кальция и воды реакционная масса разогревается до 700—800° С. Разложение карбида при недостаточном охлаждении и особенно в присутствии воздуха может привести к взрыву, поэтому необходимо процесс осуществлять при значительном избытке воды. Для разложения 1 кг карбида необходимо 5—20 л воды. Особое внимание необходимо обращать на наличие карбидной пыли в карбиде. Пыль разлагается почти мгновенно; за счет мгновенного разогрева может возникнуть взрыв ацетилена. Поэтому переработка пыли в обычных генераторах, не приспособленных для использования пыли, не допускается. Если содержание пыли значительно, карбид кальция перед загрузкой в генератор просеивают через сито с ячейками диаметром 2 мм. Накопившуюся пыль следует разложить на открытом воздухе в специальном сосуде вместимостью не менее 800—1000 л при интенсивном помешивании, одновременно высыпая не более 250 г карбидной пыли. Воду следует менять после разложения пыли в количестве до 100 кг.

Карбид кальция транспортируют и хранят в железных барабанах с толщиной стенки не менее 0,51 мм и массой 50—130 кг. Боковую поверхность барабанов делают гофрированной для большей жесткости. Карбид кальция интенсивно поглощает влагу даже из воздуха, поэтому при плохой герметичности тары возможно образование ацетилена непосредственно в барабане. Герметичность барабанов следует тщательно проверять; при перевозке барабанов на открытых машинах необходимо покрывать барабаны брезентом. При обнаружении повреждения барабана, карбид должен быть пересыпан в другую герметичную тару.

При обслуживании стационарных генераторов карбид из барабанов пересыпают в специальные приемники-бункеры. Вскрытие барабанов на станции, как правило, механизировано. Для этих целей применяют станки, в которых верхняя крышка вырезается специальным режущим роликом или клиновыми ножами. Ножи и ролик изготовляют из неискрящегося материала. Кроме того, к месту реза подается масло или азот.

Транспортировка карбида кальция в барабанах для стационарных генераторов производительностью свыше 20 м³/ч экономически не оправдана, так как раскупорка барабанов занимает значительное время; накапливается большое количество порожней тары, которая вторично не может быть использована; потери карбида за счет его дробления при перекатывании барабанов и последующего отсева от пыли значительны. Поэтому можно считать наиболее перспективным контейнерный способ перевозки и хранения карбида для стационарных установок.

При газопламенной обработке алюминия, латуни, свинца и других металлов, имеющих температуру плавления ниже температуры плавления стали, в качестве горючего газа целесообразно применять не ацетилен, а газы — заменители ацетилена или жидкие горючие.

Основные физические и тепловые свойства горючих газов приведены в табл. 2.

2. Основные физические и тепловые свойства горючих газов

Наименование горючего газа и химическая формула	Низшая теплота сгорания при 20 °С и 760 мм рт. ст., ккал/м³	Температура пламени смеси с кислородом, °С	Коэффициент замены ацетилена	Плотность при 20 °С и 760 мм рт. ст., кг/м³	Критическое давление, кгс/см²	Температура, °С: критическая *1	Температура, °С: плавления	Температура, °С: кипения	Пределы взрываемости, % содержания горючего в смеси: с воздухом	Пределы взрываемости, % содержания горючего в смеси: с кислородом	Оптимальное соотношение между кислородом и другим горючим в смеси	Относительная скорость распространения пламени
Ацетилен C_2H_2	12 600	3100—3200	1,0	1,09	61,65	+35,54	—81,0	—83,6	2,1—100	2,3—100	1,7	1,0
Водород H_2	2 400	2100—2500	5,2	0,084	12,8	—239,8	—259,2	—252,8	3,3—81,5	2,6—95	0,4	1,2
Метан CH_4	8 000	2000—2200	1,6	0,67	45,7	—82,5	—182,5	—161,7	4,8—16,7	5—59,2	2,0	—
Этан C_2H_6	14 400	2200	1,27	—	—	—	—172,1	—88,5	3,1—15,0	4,1—50,1	—	0,3
Пропан C_3H_8	20 800	2600—2750	0,65	1,88	42	+96,8	—189,9	—42,6	2,0—11	2,0—48	3,5—4,0	—
Бутан C_4H_{10}	27 800	2400—2500	0,45	2,54	36	+152	—139	—0,6	1,5—8,5	3,0—45		—
Пропан-бутан	20 600	2000—2100	0,6	1,867	—	—	—	—	2,17—9,5	—		—
Этилен C_2H_4	14 220	2900	0,9	1,17	—	—	—	—	2,7—36	2,6—80	—	—
Окись углерода CO	2 800	2600—2800	4,5	1,16	34,5	—140,2	—205	—191,5	11,4—77,5	15,5—93,9	0,7	0,5
Сланцевый газ *2	3000—3400	1500—2000	4,0	0,74—1,0	—	—	—	—	7—21	—	0,8—0,9	0,7
Коксовый газ *2	3500—4400	2000—2200	3,2	0,4—0,55	—	—	—	—	4,8—14,0	—	1,7—2,1	0,4
Природный газ *2 (метан 98%)	7500—9000	2000—2260	1,8	0,68—0,9	—	—	—	—	3,5—16,3	—	1,9—2,9	0,5
Нефтяной (попутный) газ **	8700—14 800	2000—2400	1,2	0,87—1,37	—	—	—	—	3,8—40	8,5—73,6	1,2	0,5
Городской газ *2	4100—5000	2000—2300	3,0	0,84—1,05	—	—	—	—	—	—	—	—
Пиролизный газ	7500—9000	2000—2400	1,8	0,65—0,85	—	—	—	—	3,4—10,8	2,5—60	—	—
МАПП или МАФ	21 200	2800—2900	0,55	1,76	—	—	—	+120,0	0,7—6,0	2,1—28,4	—	—
Пары бензина ($\sim C_7H_{16}$)	10 тыс. ккал/кг	2400		0,7—0,74 кг/л	—	—	—	—	1,4—5,5	—	—	—
Пары керосина ($\sim C_7H_{14}$)	10 тыс. ккал/кг	2300	—	0,79—0,82 кг/л	—	—	—	—	—	—	—	—

*1 Критической температурой называется такая температура, выше которой газ не переходит в жидкое состояние ни при каком давлении.

*2 Для горючих газовых смесей приводимые данные относятся к средним составам этих газов.

Широкие пределы изменения плотности, температуры пламени и теплоты сгорания объясняются изменяющимся химическим составом указанных газов, зависящим от месторождения или места производства.

Газы можно разделить на сжиженные, сжатые охлаждением, газовые смеси, растворенные газы, а также простые газы [11].

Сжимаемые газы. Сжимаемыми или сжатыми газами-заменителями ацетилена называют такие газы, которые при обычных условиях хранения и транспортировки не переходят в жидкое состояние ни при каких давлениях. К сжимаемым горючим газам относятся водород, метан, окись углерода, коксовый, пиролизный, природные, нефтяные и сланцевые газы.

Водород выпускают марок А, Б, В, Г. Водород марки А получают электролизом воды; марки Б — железопаровым способом и взаимодействием ферросилиция с раствором щелочи; марки В — электролизом хлористых солей; марки Г — при паровой конверсии углеводородных газов.

Водород представляет собой газ без цвета и запаха, практически нерастворим в воде; применяемый для газопламенной обработки металлов должен удовлетворять требованиям, предусмотренным ГОСТ 3022—70, которым регламентировано допустимое содержание примесей: кислорода, окиси углерода, щелочей, сероводорода, хлора и влаги. Для марки А содержание водорода должно быть 98,8%, для марки Б — 98%. Водород марок В и Г выпускают двух сортов (первого и второго): для марки В — предусмотрена чистота 98,5 и 97,5%, а для марки Г — 97,5 и 95%.

Водородно-кислородное пламя бесцветно. Зоны пламени водорода не имеют резких очертаний, что затрудняет его регулировку. На 1 м³ водорода в горелку подается 0,25—0,35 м³ кислорода, тогда как теоретически для полного сгорания необходимо 0,5 м³ кислорода. В смесях с кислородом и воздухом водород образует взрывоопасные смеси, поэтому при работе необходимо обращать особое внимание на герметичность аппаратуры и коммуникацию. В чистом виде водород для газопламенной обработки применяют сравнительно редко: в основном при сварке и пайке свинца и при особых видах кислородной резки, где требуется подача горючего в резак под высоким давлением. Чаще водород является одним из компонентов составного горючего газа. Чем больше водорода в горючем, тем ниже тепловые характеристики последнего, выше скорость воспламенения и верхний предел взрываемости.

Метан имеет широкий диапазон взрываемости. Метан получают из природного или коксового газа методом глубокого охлаждения. Температура воспламенения метана 340° С. Для полного сгорания 1 м³ метана необходимо 2 м³ кислорода. Максимальная скорость распространения пламени в смеси с кислородом 3,3 м/с. Метан является единственным углеводородом, имеющим критическую температуру значительно ниже температуры окружающей среды, наряду с водородом и углекислым газом. В чистом виде для газопламенной обработки метан применяют редко. Он является основным компонентом природных газов и входит в состав других сжимаемых горючих газов.

3. Средний состав природных газов некоторых месторождений СССР

Месторождение	Состав газа, % (объемные)							
	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12} и выше	CO_2	H_2S	N_2
Уренгойское	99,4	0,3	—	—	—	0,3	—	—
Игримское	93,9	2,3	0,7	0,5	0,5	0,1	—	2,0
Шебелинское	93,6	4,0	0,6	0,7	0,4	0,1	—	0,6
Мирненское	82,4	9,6	1,6	0,6	0,6	4,0	—	1,2
Ичакское	93,4	3,6	0,9	0,4	0,3	0,4	—	1,0
Газлинское	94,2	3,2	0,1	0,1	0,1	0,2	—	2,1
Усть-Вилюйское	92,5	2,8	1,8	0,9	0,4	0,2	—	1,4
Майкопское	88,7	5,1	1,6	1,0	1,1	1,5	—	1,0
Карадагское	88,6	2,9	1,8	1,0	4,7	0,8	—	0,2
Оренбургское	86,9	4,0	1,4	0,6	0,3	0,1	1,3	5,4
Вуктыльское	75,7	9,1	3,1	0,7	7,5	0,2	—	3,7

Природные и городские газы (табл. 3) представляют собой смеси газообразных предельных углеводородов с преобладающим количеством метана (75,7—99,4%) и небольшим количеством инертных газов и азота. Низшая теплота сгорания природных газов также колеблется в пределах 7480—9060 ккал/м³. Природный газ почти не имеет запаха, поэтому в газ, идущий к потребителю, добавляют одорант, придающий ему резкий запах, по которому можно установить утечку газа. Природный газ может поступать к потребителю либо в баллонах, либо по газопроводу. Газопроводы природных, нефтяных и сжиженных газов делят на три группы: низкого давления (до 0,05 кгс/см²), среднего давления (от 0,05 до 3 кгс/см²) и высокого давления (от 3 до 12 кгс/см²). Смесь природных газов с низкокалорийными (коксовым, генераторными и др.) называют городским газом и применяют для бытовых целей, а также для кислородной резки.

Окись углерода входит в состав коксового (5—12%), городского (5—15%), нефтяного пиролизного газа (1—11%) и др. Окись углерода ядовита. Предельно допустимая концентрация ее в производственных помещениях 0,03 мг/л.

Коксовый газ представляет собой смесь газообразных продуктов сухой перегонки каменного угля. В зависимости от места добычи угля и технологии выработки коксовый газ содержит: 40—60% H_2, 20—30% CH_4, 5—12% CO, 1,5—4% тяжелых углеводородов, 2—3% CO_2, 0,4—1,0% O_2. Коксовый газ имеет сравнительно низкую теплоту сгорания, но, несмотря на это, находит широкое применение на металлургических заводах, где он является побочным продуктом. Для газопламенной обработки применяют только хорошо очищенный газ, так как в противном случае узкие каналы аппаратуры засоряются смолистыми веществами, находящимися в виде паров в составе газа, или стенки газопроводов разъедаются сернистыми соединениями, имеющимися в коксовом газе. При использовании коксового газа мундштуки следует изготовлять из латуни или чугуна. Для полного сгорания 1 м³ коксового газа необходимо обеспечить подачу 0,9 м³ кислорода. К месту потребления коксовый газ транспортируют либо в баллонах под давлением 150 кгс/см², либо по газопроводу под низким давлением (30—50 мм вод. ст.). Давление может быть повышено до 1—1,5 кгс/см² с помощью газодувок. В коксовом газе содержится до 12% окиси углерода.

Нефтяные газы представляют собой смесь горючих газов. В зависимости от способов получения нефтяные газы подразделяют на естественные, являющиеся спутниками нефти при ее добыче, и искусственные (заводские). Естественные нефтяные газы иногда называют сопутствующими или попутными. Основными компонентами естественных нефтяных газов являются метан, этан, пропан, бутан и более высокомолекулярные углеводороды парафинового ряда. В состав заводских нефтяных газов, кроме того, входят углеводороды олефинового ряда: этилен, пропилен, бутилен, амилен. Искусственные нефтяные газы в отличие от естественных содержат до 60% H_2.

Сланцевый газ получают при газификации горючих сланцев в специальных генераторах и применяют для химической переработки и бытовых целей как городской газ. С некоторыми ограничениями он может быть использован и для процессов газопламенной обработки металлов.

Пиролизный газ — продукт термического разложения нефтяного мазута. После очистки в газе образуются сернистые соединения, взаимодействующие с медью. Рекомендуется тщательная очистка газа, так как в противном случае медные мундштуки газоаппаратуры разрушаются после 3—4 ч работы. Мундштуки, так же как и при работе с коксовым газом, следует изготовлять из латуни или чугуна.

Сжиженные газы. Сжиженными газами называют углеводороды и их смеси, находящиеся при температуре 20° С и давлении 760 мм рт. ст. в газообразном состоянии, а при сравнительно небольшом повышении давления или понижении температуры переходящие в жидкое состояние. Сжиженные газы даже в газообразном состоянии имеют плотность более высокую, чем плотность воздуха, поэтому они могут скапливаться на поверхности земли или пола. В жидкой фазе сжижен-

ные газы отличаются большим коэффициентом объемного расширения, значительно превышающим коэффициент объемного расширения воды. Эти свойства сжиженных газов требуют особой осторожности и соблюдения мер безопасности при работе с ними. К сжиженным газам, используемым для газопламенной обработки металлов, относятся смеси технического пропана и бутана, а также смеси метилацетилена и пропадиена.

Пропан-бутановые смеси получают при добыче природных (попутных) газов, а также при переработке нефти и нефтепродуктов. Пропан-бутановые смеси могут быть переведены в жидкое состояние. Так, при температуре —40° С даже при атмосферном давлении пропан-бутановая смесь представляет собой жидкость. Хранить пропан-бутан следует в емкостях, рассчитанных на работу под давлением. Хранить сжиженные газы в открытых емкостях запрещено, так как испарение этих газов происходит даже при 0° С, а смеси пропан-бутановых паров с воздухом взрывоопасны. Упругость паров с увеличением температуры резко возрастает. При испарении 1 кг жидкого пропана получается 0,535 м³ паров, а при испарении того же количества бутана — 0,406 м³ паров. Пропан-бутановая смесь, по сравнению с другими горючими газами, обладает самой большой теплотой сгорания. Количество тепла, передаваемое металлу в единицу времени пламенем, называемое эффективной мощностью пламени, для пропан-бутановых смесей выше, чем для ацетилена, однако скорость распространения пламени для этой смеси значительно ниже и длина конуса резко увеличена, в результате пропан-бутановое пламя менее концентрировано. Пропан-бутан может поступать к потребителю либо в баллонах под давлением до 16 кгс/см², либо по газопроводам от перепускной рампы или стационарной емкости с испарителем. Состав сжиженных газов регламентируется по ГОСТ 10196—62. Сжиженные углеводородные топливные газы изготовляют следующих марок: пропан технический, состоящий в основном из пропана или пропана и пропилена; бутан технический, состоящий из бутана или бутана и бутилена, и смесь пропана и бутана технических.

Метилацетилен-пропадиен МАПП (широко применяемый в США) — смесь горючих газов; по физическим свойствам близок к пропану. Пределы взрываемости МАПП в смеси с воздухом 3,4—10,8%, в смеси с кислородом 2,5—60%. Смеси метилацетилена и пропадиена термодинамически нестойки, поэтому в состав МАППа вводят стабилизатор. Распад метилацетилена, аналогично ацетилену, происходит с большим выделением тепла. Температура пламени МАПП (2900° С) близка к температуре ацетилена. МАПП используют для кислородной резки и сварки и других газопламенных процессов.

Горючее МАФ — метилацетиленовая пропадиеновая фракция является отходом олифинового производства, а также отходом производства этилена и винилацетилена. Эта фракция содержит 48—75% смеси метилацетилена и пропадиена и стабилизаторы: 3% пропилена, 15% пропана, 7% других углеводородов. Пределы взрываемости для МАФа те же, что и для МАППа. МАФ нечувствителен к удару. Баллоны с МАФом не взрываются, находясь рядом с горящим баллоном. Смесь инертна при температуре до 215° С и давлении до 20 кгс/см². При соприкосновении с медью образуются взрывоопасные соединения — ацетилениды меди. Скорость распространения пламени МАФ равна 470 см/с. Вместимость баллонов для сжиженных газов 40 или 55 дм³; толщина стенки 3 мм. Предельное рабочее давление (кгс/см²) в баллонах для сжиженных газов различно: для пропана не более 16, для пропилена 20, для бутана и бутилена 3,8. Коэффициент наполнения баллонов сжиженными газами (в кгс/м³) соответственно будет равен: 425 для пропана, 445 — пропилена, 448 — бутана и 526 — бутилена. Коэффициент наполнения обозначает массу газа в кг на 1 м³ вместимости баллона и не должен превышать значений, указанных для каждого газа.

Сжиженные газы можно транспортировать также в железнодорожных цистернах и автоцистернах, вместимость которых соответственно равна 51—54 и 2—10 м³. Сжиженные газы в больших количествах хранят в сферических или горизонтальных цилиндрических резервуарах.

Жидкие горючие. *Бензин и керосин* — летучие и огнеопасные жидкости, являются продуктами переработки нефти. В газопламенной обработке их используют в виде паров, которые получают в специальной аппаратуре, обеспечивающей давление до 3 кгс/см². К потребителю они поступают в цистернах или бочках под атмосферным давлением. Основная характеристика паров бензина и керосина — коэффициент замены, равный 1,0—1,3. Температура пламени при сгорании в кислороде 2400—2500° С, низшая теплотворная способность 10 200—11 000 ккал/кг, пределы взрываемости с воздухом 2,6—6,7 для бензина и 1,4—5,5 для керосина. Пары бензина и керосина ядовиты и при продолжительном вдыхании могут вызвать сильную головную боль и головокружение. Пары бензина и керосина находят применение при сварке легкосвариваемых металлов, пайке и кислородной резке.

ГОРЮЧИЕ — ЗАМЕНИТЕЛИ АЦЕТИЛЕНА

В связи с дефицитностью и высокой стоимостью карбида кальция — основного сырья для получения ацетилена, для многих газопламенных процессов следует использовать не ацетилен, а горючие газы — заменители ацетилена.

При правильном выборе мощности пламени газа-заменителя, несмотря на некоторое снижение скорости процесса, увеличение длительности начального подогрева и увеличение расхода кислорода, достигается заметная экономия средств, повышается безопасность работ и экономится время газосварщиков и газорезчиков на обслуживание средств газопитания. Основные области применения газов—заменителей ацетилена при газопламенной обработке металлов [7] указаны в табл. 4.

Давление горючих газов перед огневой аппаратурой устанавливается в соответствии с ГОСТ 8856—72. Согласно ГОСТу давления делятся на первый, второй и третий разряды, для которых нижние пределы давления ацетилена соответственно равны 0,01; 0,1 и 0,3 кгс/см², а верхний предел давления ацетилена не должен превышать 1 кгс/см². Для газов-заменителей первый разряд давления отсутствует, а пределы для второго и третьего разряда соответственно равны: нижние пределы 0,2 и 0,5 кгс/см²; верхние пределы 3,0 и 6,0 кгс/см².

Основные расчетные характеристики газов—заменителей ацетилена [9]. Горючие газы имеют различные температуры воспламенения, поэтому форма и размеры конуса пламени также различны для каждого из них. При одинаковом соотношении скоростей истечения и горения длина конуса ацетилено-кислородного пламени меньше, чем длина конуса для ацетилено-заменителей. Так как при более длинных конусах пламени увеличивается зона нагрева металла и возрастают тепловые потери из пламени, то для сообщения металлу необходимого количества тепла потребуется гораздо большее количество газов—заменителей ацетилена.

При расчете основных размеров каналов огневой аппаратуры для газов, образующих горючую смесь (горючего газа и кислорода), необходимо знать расход ($v_к$, м³/ч) кислорода и расход ($v_г$ м³/ч) горючего, объемное (для жидких горючих — весовое) соотношение ($\beta_г$) между кислородом и горючим в смеси и относительную скорость (s_0) распространения пламени. На тепловые свойства газового пламени (температуру и эффективную мощность) влияет соотношение кислорода и горючего газа в смеси.

Оптимальное соотношение для сжимаемых горючих газов при полном сгорании горючей смеси

$$\beta_г = \frac{v_к}{v_г} = 0{,}009\left[0{,}5H_2 + 2CH_4 + 3{,}5\,(C_3H_6 + C_4H_{10}) + \left(m + \frac{n}{4}\right)C_mH_n + 0{,}5CO + 1{,}5H_2S\right] - 0{,}01O_2,$$

где H_2, CH_4, C_3H_8, C_4H_{10}, C_mH_n, CO, H_2S и O_2 — содержание элементарных составляющих горючего газа в процентах (по объему).

4. Область применения горючих газов при газопламенной обработке металлов *

Виды газопламенной обработки металлов	Горючие-заменители									
	Ацетилен	Водород	Природные и городские газы	Коксовый газ	Нефтяные и пиролизные газы	Сланцевые газы	Пропанбутановые смеси	МАПП (МАФ)	Бензин	Керосин
Соединение:										
газовой сваркой	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
газопрессовой сваркой	+	+	+				+	+		
наплавкой	+		+				+	+		
сваркой плавлением	+	+	+	+			+	+		
пайкой	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Нагрев:										
при поверхностной пламенной закалке	+		+	+	+		+	+	+	+
при огневой правке	+		+	+	+	+	+	+	+	+
при поверхностной пламенной очистке	+		+				+	+		
при местном газопламенном нагреве	+	+	+	+	+		+	+	+	+
Напыление:										
газопламенное	+							+		
плазменное		+								
Резка:										
кислородно-ацетиленовая жидким горючим	+								+	+
кислородно-флюсовая	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
безгратовая	+						+	+		
скоростная	+		+				+			
скоростная высококачественная кислородная	+	+	+				+	+		
кислородом высокого давления больших толщин	+	+	+				+	+		
с предварительным подогревом	+		+	+	+	+	+	+	+	+
сплошная огневая зачистка	+	+	+				+	+		
кислородная подводная		+								
газолазерная		+								
плазменно-дуговая		+								

* Знаком (+) обозначены те виды газопламенной обработки, при которых использование данного горючего технически возможно.

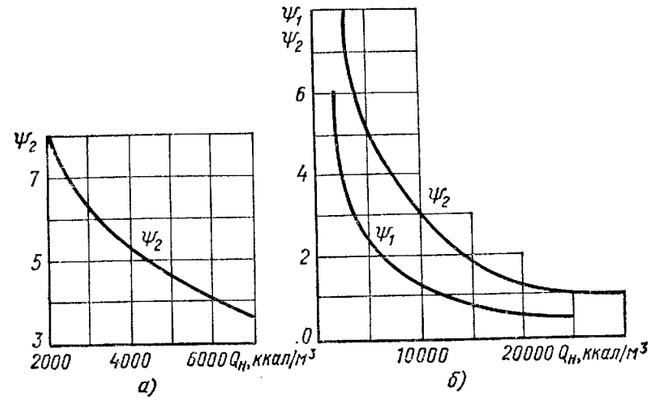
Входящие тяжелые углеводороды C_nH_{2n} считают как этилен C_2H_4. Оптимальные соотношения кислорода и некоторых горючих газов приведены в табл. 2. Соотношение окислителя и горючего устанавливают по внешнему виду пламени; при этом рабочее значение $\beta_г$ обычно ниже оптимального.

Коэффициент замены ацетилена. По технологическим данным конкретного газопламенного процесса известен необходимый расход $v_а$ ацетилена. При замене ацетилена другим горючим газом следует произвести расчет расхода $v_г$ горючего с учетом условий получения оптимальной производительности процесса. Применительно к этому все виды газопламенной обработки металлов можно разделить на две группы. К первой группе относятся такие процессы, как кислородная разделительная резка, пайка, нагрев металла с целью правки, для которых количество горючего газа выбирают по эффективной мощности движущегося пламени, равной эффективной мощности движущегося ацетилено-кислородного пламени, используемого для этих процессов.

Отношение количества горючего газа — заменителя ацетилена к количеству ацетилена для указанной выше группы процессов называется коэффициентом замены первого рода:

$$\psi_1 = \frac{v_г}{v_а}.$$

Ко второй группе относятся такие процессы, как поверхностная кислородная резка, закалка, сварка, для которых количество горючего газа выбирают из расчета равенства времени нагрева металла до определенной температуры пламенем газа — заменителя ацетилена и ацетилено-кислородным пламенем. В этом случае устанавливается коэффициент $\psi_г$ замены второго рода. Коэффициенты замены первого и второго рода могут быть определены по графикам, приведенным на рисунке, в зависимости от низшей теплоты сгорания $Q_н$ горючих газов. Графики построены для газов с температурой горения в смеси с кислородом 1800—2900° С при условии замены ими ацетилено-кислородной смеси с соотношением газов $\beta_г = 1{,}15$.



Зависимость коэффициентов замены ацетилена ψ_1 и ψ_2 от низшей теплоты сгорания $Q_н$ газа-заменителя:

а — с теплотой сгорания до 10 000 ккал/м³; *б* — с теплотой сгорания св. 10 000 ккал/м³

Низшая теплотворная способность горючего газа (ккал/м³), состоящего из нескольких горючих газов при 20° С и давлении 760 мм рт. ст.,

$$Q_н = 24H_2 + 80CH_4 + 208C_3H_8 + 278C_4H_{10} + 166C_mH_n + 28CO + 53H_2S,$$

где H_2, CH_4, C_3H_8, C_4H_{10}, C_mH_n, CO, H_2S — составляющие горючих газов в процентах (объемных).

Относительная скорость s_0 распространения пламени по сравнению со скоростью распространения пламени ацетилено-кислородной смеси нормального состава, принимаемой за единицу, для пламени горючих смесей, состоящих из нескольких горючих газов,

$$s_0 = \frac{1{,}2H_2 + CH_4 + 3(C_3H_8 + C_mH_n) + 0{,}15CO}{H_2 + 2{,}3CH_4 + 6{,}2(C_3H_8 + C_mH_n) + CO} - 0{,}007(CO_2 + N_2),$$

где H_2, CH_4, C_3H_8, C_mH_n, CO, CO_2, N_2 — содержание элементарных составляющих горючего газа в балласте в процентах (объемных).

Основы расчета огневой аппаратуры [2, 3]. Мундштуки огневой аппаратуры могут быть разделены на односопловые, многосопловые и щелевые. Многосопловые мундштуки делят на однорядные линейные, однорядные кольцевые, многорядные линейные и многорядные кольцевые. Щелевые мундштуки делят на линейные и кольцевые. Допустимая скорость u, м/с истечения газа из огневой ап-

паратуры при нормальном горении регламентируется пределами: верхним, при котором не происходит отрыва пламени от мундштука; нижним, при котором пламя не втягивается в сопло мундштука, т. е. не происходит хлопка или обратного удара.

Диаметр внутреннего отверстия цилиндрического сопла, исходя из условия соблюдения допустимых скоростей истечения,

$$d_c = \sqrt[2,37]{\frac{2,8 v_г}{s_o n}},$$

где n — число сопл в мундштуке, которым следует задаться исходя из конструктивных и технологических соображений.

При конструировании щелевых мундштуков задаются внутренним диаметром d щели; наружный диаметр щели

$$D = \sqrt{2,8 \frac{v_г}{s_o} + d};$$

можно также задаться наружным диаметром щели и определить ее внутренний диаметр.

Список литературы

1. **Антонов И. А.** Газопламенная обработка металлов. М., «Машиностроение», 1976. 264 с.
2. **Быков В. В., Файзулина Т. С.** Газопламенные горелки. М., «Машиностроение», 1974. 69 с.
3. **Быков В. В., Файзулина Т. С.** Газовые резаки М., «Машиностроение», 1974. 65 с.
4. **Иванов Б. А.** Физика взрыва ацетилена. М., «Химия», 1969. 180 с.
5. **Кислород.** Справочник. Ч. I, II. М., «Металлургия», 1967. 423 с; 464 с.
6. **Ковальский В. А.** Ацетиленовые генераторы. М., «Машиностроение», 1974. 97 с.
7. **Лебедев В. В.** Водород, его получение и использование. М., изд. АН СССР, 1958. 69 с.
8. **Некрасов Ю. И.** Газы — заменители ацетилена. М., «Машиностроение», 1974. 97 с.
9. **Нинбург А. К.** Газопламенная обработка металлов с использованием газов — заменителей ацетилена. М., «Машиностроение», 1976. 152 с.
10. **Правила** техники безопасности и производственной санитарии при производстве ацетилена, кислорода и газопламенной обработки металлов. М., «Машиностроение», 1967. 119 с.
11. **Стаскевич Н. Л.** Справочное руководство по газоснабжению. Л., Гостоптехиздат, 1960. 875 с.
12. **Стрижевский И. И.** Технология, основы и безопасность производства газообразного и растворенного ацетилена. Л., «Химия», 1968. 304 с.
13. **Указания** по проектированию и монтажу трубопроводов газообразного кислорода У347—00—4. М., «Металлургия», 1965. 62 с.

Глава 4

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Материал и конструкция электродов определяют качество сварного соединения, производительность, а в некоторых случаях и возможность ведения процесса контактной сварки.

Требования к материалам электродов контактных машин целесообразно рассматривать в зависимости от их конкретного назначения. Например, электроды точечных и шовных машин работают при высокой плотности тока (до 250—300 А/мм²). Материал электродов этой группы должен обладать высокой электро- и теплопроводностью, малой склонностью к взаимодействию с металлом свариваемых деталей, особенно при сварке легких сплавов, большой твердостью и высокой температурой рекристаллизации при сварке коррозионно-стойких и жаропрочных сплавов. Электропроводность электродов не ниже 70% электропроводности чистой меди при твердости *HB* 100—160 и температуре рекристаллизации 250—500° С. Чем выше электропроводность и твердость свариваемых материалов, тем выше должны быть эти показатели у материалов электрода (ГОСТ 14111—77).

Электроды контактных машин для стыковой и рельефной сварки работают при сравнительно малых плотностях тока (до 12—15 А/мм²). К материалам этих электродов предъявляют пониженные требования по тепло- и электропроводности (до 35% электропроводности меди) и повышенные требования по твердости в условиях эксплуатации (*HB* до 180—200). Последнее условие позволяет обеспечить меньший износ электродов, более точную центровку заготовок при стыковой сварке и более равномерное распределение сил и тока при групповой рельефной сварке.

Для изготовления электродов применяют холоднотянутую технически чистую медь. Однако при высокой тепло- и электропроводности она имеет низкое сопротивление деформации при повышенной температуре, в связи с чем наибольшее распространение получили различные сплавы на медной основе. Наилучшим комплексом свойств обладают дисперсионно-твердеющие электродные сплавы. В качестве легирующих элементов используют Cr, Cd, Zr, Mg, Zn, Ag, Co. Для сохранения высокой тепло- и электропроводности их количество обычно не превышает 1—1,5%. Для упрочнения в сплавы вводят Ni, Si, Fe, а для повышения температуры рекристаллизации — в малых количествах B, Be, Ti, Zr. Сопротивление меди окислению при 500—700° С можно повысить небольшими добавками Al, Mg, Be. Присадка серебра и магния в медь способствует увеличению числа сваренных точек без потемнения поверхности изделия из алюминиевых сплавов [4]. Состав и основные свойства металлов и сплавов, применяемых для изготовления электродов, приведены в таблице [1, 3, 4, 7, 8].

Наиболее высокой электропроводностью обладают сплавы БрКд1 (МК) и МС1, применяемые в наклепанном состоянии для сварки алюминиевых и магниевых сплавов. При сварке сплавов АМг6Н, АМц и Д16 большей стойкостью по сравнению с кадмиевой бронзой обладают высокоэлектропроводные медные сплавы с малыми добавками серебра или магния и бора, имеющие мелкозернистую структуру [6]. Незначительные добавки серебра (~0,1%) повышают температуру рекристаллизации меди на 100—150° С при снижении электропроводности на 1%. Для значительного повышения стойкости электродов при сварке алюминиевых сплавов в медно-магниевый сплав (Mg до 0,3%) вводят до 0,1% B. Можно также применять электроды с цирконием (0,27—0,31% Zr, остальное Cu). Предложенные для сварки алюминиевых и магниевых сплавов металлокерамические электроды системы Cu—Al_2O_3 [2] с содержанием окислов около 3% имеют электро-

Материал электродов	Содержание легирующих элементов, % (остальное медь)	Вид термомеханической обработки *	Электропроводность по отношению к электропроводности технически чистой отожженной меди, %	Твердость по Бринелю **	Температура рекристаллизации, °С	Область применения
Медь холодиотянутая М1	—	Д. 50%	98	80	200	Электроды для точечной и шовной сварки алюминиевых и медных сплавов. Губки для стыковых машин при работе с малой тепловой нагрузкой
Сплав меди с серебром МС1	0,07—0,12 Ag	Д. 50%	97—99	90—100	350	
Бронза кадмиевая БрКд1 (МК)	0,9—1,2 Cd или 0,4—0,7 Cd	З. 760—780°, 2—3 ч Д. 40—60%	85—90	95—115	250—300	
Сплав медн с магнием и бором	До 0,3 Mg, до 0,1 B	З. 960°, 1,5 ч Д. 40—50% О. 460°, 5 ч	92	110	330—390	
Бронза циркониевая БрЦр	До 0,37 Zr	З. 920—960° Д. 50% О. 450—460°, 5 ч	90—95	130—150	480	Электроды для точечной, шовной, рельефной и стыковой сварки легких сплавов, сталей различных марок, титана, никеля, бронз, латуней
Бронза хромокадмиевая Мц5Б (БрХКд—0,5—0,3)	0,2—0,4 Cr 0,2—0,35 Cd	З. 940—960°, 0,5—1 ч Д. 20—30% О. 470—490°, 4 ч	80—95	110—130	350—400	
Бронза хромоциркониевая БрХЦр—0,6—0,05	0,5—0,7 Cr 0,03—0,06 Zr	З. 940—960°, 1—1,5 ч Д. 40—60% О. 470—490°, 4 ч	80—82	140—160	500	Электроды для точечной и шовной сварки низколегированных сталей, титана, никеля, латуни, бронз. Губки стыковых машин
Бронза хромовая БрХ	0,4—1,0 Cr (в прутках 0,4—0,7 Cr)	З. 980—1000°, 1,5—2 ч Д. 15—30% О. 460—480°, 5 ч	80—85	140—180	370—420	

Продолжение табл.

Материал электродов	Содержание легирующих элементов, % (остальное медь)	Вид термомеханической обработки *	Электропроводность по отношению к электропроводности технически чистой отожженной меди, %	Твердость по Бринелю **	Температура рекристаллизации, °С	Область применения
Сплав Мц4	0,4—0,8 Cr 0,1—0,2 Al 0,1—0,2 Mg	З. 1000—1020°, 1—1,5 ч О. 470—490°, 4 ч	75—78	110—120	400	Электроды для точечной, шовной и стыковой сварки коррозионно-стойких и жаропрочных сталей, титана
Бронза никельбериллий-титановая БрНБТ	1,4—1,6 Ni 0,2—0,4 Be 0,05—0,15 Ti	З. 900—950°, 2—2,5 ч О. 475—550°, 2—3 ч	50—55	170—220	500—510	
Бронза кремненикелевая БрКН—1—4 (или БрКН—0,5—0,25)	0,6—1,0 Si 3—4 Ni	—	40—45	140	430—450	Электроды для стыковой, рельефной и шовной сварки с большой тепловой нагрузкой и большим истиранием
Бронза алюминийжелезоникелевая БрАЖН11	1,1—1,2 Al 3,5—4,0 Fe 0,4—0,6 Ni	—	40	225	550	
Эльконайт ВМ	70—80 W	Спекание	25—30	200—220	900	Вставки в электроды для точечной рельефной и стыковой сварки. Электроды для сварки серебра, платины, меди, луженой стали
Молибден	98—99 Mo	—	34—37	250—300	850	
Вольфрам	100 W	—	30—32	440—450	1000	

проводность 80% электропроводности технически чистой меди, твердость *HB* 105—108 и температуру рекристаллизации 600—650° С. Электроды из этого материала применяют без дополнительной термомеханической обработки. Высокая температура разупрочнения позволяет замедлить процесс химического взаимодействия со свариваемым материалом — потемнение поверхности деталей из сплава АМг6 наступает через 80—90 точек. При применении электродов из сплава БрКд1 аналогичный эффект обнаруживается уже через 18—20 точек.

Для сварки сталей и титановых сплавов используют более твердые, но не менее электропроводные сплавы меди с хромом и добавками Cd, Al, Mg, Zr. Среди них наибольшее распространение нашли дисперсионно-твердеющие сплавы БрХ, БрХЦр, Мц5Б, упрочняемые термомеханической обработкой. Сплав Мц5Б является наиболее универсальным, его можно использовать при сварке большинства рассматриваемых материалов. Сплав Мц4 применяют в основном для литья фигурных электродов. Для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей одним из лучших является сплав меди с 0,25—0,45% Cr и добавками Zr и Ti (по 0,04—0,08%). Такой сплав обеспечивает в термически обработанном состоянии крупнозернистую структуру, твердость *HB* 140—150, высокую пластичность в интервале рабочих температур и электропроводность 70—80% электропроводности технически чистой меди.

Наиболее высокой твердостью и жаропрочностью из сплавов на основе меди обладает бронза БрНБТ, применяемая для сварки жаропрочных сталей, никелевых и кобальтовых сплавов. Для сварки материалов с высоким электросопротивлением, преимущественно коррозионно-стойких и жаропрочных сталей при соотношении толщин более 2 : 1, а также для сварки материалов с резко различными теплофизическими свойствами предложен сплав [5]: 2—3% Ni; 0,2—0,6% Ti; 0,3—0,6% Be; 1,5—2% Fe; 0,1—0,25% B, остальное медь. Условиям работы электродов для стыковой и рельефной сварки в наибольшей степени удовлетворяют сплавы БрНБТ, ЭВ, БрАЖН11, БрКН1-4.

Особую группу материалов представляют вольфрам, молибден, эльконайт ВМ и др. Они имеют высокую твердость и жаропрочность, целесообразную для вставок составных электродов при рельефной сварке, и низкую электро- и теплопроводность, используемую, например, при сварке деталей с большой разницей толщин, деталей из разнородных металлов, а также металлов (серебро, медь, латунь), имеющих малое удельное электрическое сопротивление.

В зарубежной практике из высокоэлектропроводных материалов для электродов контактных машин применяют кадмиевую (1% Cd) и циркониевую (0,15% Zr) бронзы, медь с присадкой серебра до 1%, теллура и др. [4]. Хромовые бронзы с небольшими добавками (до 0,1%) циркония рекомендуются как лучшие по стойкости для сварки углеродистых сталей. Для сварки коррозионно-стойких и жаропрочных сталей наибольшее распространение нашли сплавы на основе тройной системы Cu—Co—Be (2—2,5% Co; 0,3—0,5% Be; остальное Cu).

Список литературы

1. **Кабанов Н. С., Слепак Э. Ш.** Технология стыковой контактной сварки. М., «Машиностроение», 1970. 264 с.

2. **Колпашников А. И., Ципулин И. П., Григорьев М. М.** Стойкость электродов из дисперсионно-упрочненных материалов при точечной сварке алюминиевых сплавов. — «Сварочное производство», 1975, № 1, с. 31—32.

3. **Петров Г. Л.** Сварочные материалы. Л., «Машиностроение», 1972. 280 с.

4. **Слиозберг С. К., Чулошников П. Л.** Электроды для контактной электросварки. Л., «Машиностроение», 1972. 96 с.

5. **Сплав** для электродов контактных сварочных машин. Авторское свидетельство СССР № 291766, кл. В23к 11/30. — Бюллетень «Изобретения. Промышленные образцы. Товарные знаки», 1971, № 4, с. 31. Авт.: В. П. Бакалев и др.

6. **Стойкость** электродов при точечной сварке легких сплавов — «Сварочное производство», 1969, № 8, с. 25—26. Авт.: Э. М. Михайлова и др.

7. **Технология** и оборудование контактной сварки. Под ред. Б. Д. Орлова. М., «Машиностроение», 1975. 536 с.

8. **Чулошников П. Л.** Точечная и роликовая электросварка легированных сталей и сплавов М., «Машиностроение», 1974. 232 с.

Глава 5
СВАРКА КОНСТРУКЦИОННЫХ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

СОСТАВ И СВОЙСТВА СТАЛЕЙ

Углерод является основным легирующим элементом в углеродистых конструкционных сталях и определяет механические свойства сталей этой группы. Повышение его содержания усложняет технологию сварки и затрудняет возможности получения равнопрочного сварного соединения без дефектов. Стали с содержанием углерода до 0,25% относятся к низкоуглеродистым. По качественному признаку углеродистые стали разделяют на две группы: обыкновенного качества и качественные. По степени раскисления стали обыкновенного качества обозначают: кипящую — кп, полуспокойную — пс и спокойную — сп. Кипящая сталь, содержащая не более 0,07% Si, получается при неполном раскислении металла марганцем. Сталь характеризуется резко выраженной неравномерностью распределения серы и фосфора по толщине проката. Местная повышенная концентрация серы может привести к образованию кристаллизационных трещин в шве и околошовной зоне. Кипящая сталь склонна к старению в околошовной зоне и переходу в хрупкое состояние при отрицательных температурах. Спокойные стали получаются при раскислении марганцем, алюминием и кремнием и содержат не менее 0,12% Si; сера и фосфор распределены в них более равномерно, чем в кипящих сталях. Эти стали менее склонны к старению и отличаются меньшей реакцией на сварочный нагрев. Полуспокойная сталь по склонности к старению занимает промежуточное положение между кипящей и спокойной сталью. Сталь обыкновенного качества поставляют без термической обработки в горячекатаном состоянии. Изготовленные из нее конструкции также не подвергают последующей термической обработке. Эти стали изготовляют по ГОСТ 380—71, ГОСТ 4543—71, ГОСТ 5520—69 и ГОСТ 5521—76 (табл. 1).

Сталь углеродистую обыкновенного качества в соответствии с ГОСТ 380—71 подразделяют на три группы. Сталь группы А поставляют по механическим свойствам и для производства сварных конструкций не используют (группу А в обозначении стали не указывают; например, Ст3). Сталь группы Б поставляют по химическому составу, а группы В по химическому составу и механическим свойствам. Перед обозначением марки этих сталей указывают их группу, например, БСт3, ВСт3. Полуспокойную сталь марок 3 и 5 производят с обычным и повышенным содержанием марганца (после номера марки ставят букву Г (см. табл. 1). Стали ВСт1, ВСт2, ВСт3 всех степеней раскисления и сталь ВСт3Гпс, а также стали БСт1, БСт2, БСт3 всех степеней раскисления и сталь БСт3Гпс (по требованиям заказчика) поставляются с гарантией свариваемости. Для ответственных конструкций используют сталь группы В.

Углеродистую качественную сталь с нормальным (марки 10, 15 и 20) и повышенным (марки 15Г и 20Г) содержанием марганца поставляют в соответствии с ГОСТ 1050—74 и ГОСТ 4543—71. Она содержит пониженное количество серы. Стали этой группы для изготовления конструкций применяют в горячекатаном состоянии и в меньшем объеме после нормализации или закалки с отпуском (термоупрочнение). Механические свойства этих сталей зависят от термической обработки. Сварные конструкции, изготовленные из этих сталей, для повышения прочностных свойств можно подвергать последующей термической обработке. Механические свойства некоторых низкоуглеродистых сталей обычного качества и качественных сталей приведены в табл. 2 и 3.

1. Химический состав некоторых низкоуглеродистых конструкционных сталей, %

Марка стали	C	Mn	Si
ВСт1кп	0,06—0,12	0,25—0,50	Не более 0,05
ВСт1пс	0,06—0,12	0,25—0,50	0,05—0,17
ВСт1сп	0,06—0,12	0,25—0,50	0,12—0,30
ВСт2кп	0,09—0,15	0,25—0,50	Не более 0,07
ВСт2пс	0,09—0,15	0,25—0,50	0,05—0,17
ВСт2сп	0,09—0,15	0,25—0,50	0,12—0,30
ВСт3кп	0,14—0,22	0,30—0,60	Не более 0,07
ВСт3Гпс	0,14—0,22	0,40—0,65	0,05—0,17
ВСт3сп	0,14—0,22	0,40—0,65	0,12—0,30
10	0,07—0,14	0,35—0,65	0,17—0,37
15	0,12—0,19	0,35—0,65	0,17—0,37
20	0,17—0,24	0,35—0,65	0,17—0,37
15Г	0,12—0,19	0,70—1,00	0,17—0,37
20Г	0,17—0,24	0,70—1,00	0,17—0,37
12К	0,08—0,16	0,40—0,70	0,17—0,37
15К	0,12—0,20	0,35—0,65	0,15—0,30
16К	0,12—0,20	0,45—0,75	0,17—0,37
18К	0,14—0,22	0,55—0,85	0,17—0,37
20К	0,16—0,24	0,35—0,65	0,15—0,30
С	0,14—0,20	0,50—0,90	0,12—0,35

Стали, содержащие специально введенные элементы, которые отсутствуют в углеродистых сталях, называют легированными. Марганец считают легирующим компонентом при содержании его в стали более 0,7% по нижнему пределу, а кремний — при содержании свыше 0,4%. Поэтому углеродистые стали марок ВСт3Гпс, ВСт5Гпс, 15Г и 20Г с повышенным содержанием марганца по свариваемости следуст отнести к низколегированным конструкционным сталям. Легирующие элементы, вводимые в сталь, образуя с железом, углеродом и другими элементами твердые растворы и химические соединения, изменяют ее свойства. Это повышает механические свойства стали и, в частности, снижает порог хладноломкости. В результате появляется возможность снизить массу конструкций. В промышленности при производстве сварных конструкций широко используют низкоуглеродистые низколегированные стали (табл. 4 и 5). Суммарное содержание легирующих элементов в этих сталях не превышает 4,0% (не считая углерода), а углерода 0,25%.

В зависимости от вводимых в сталь легирующих элементов низколегированные стали разделяют на марганцовистые, кремнемарганцовистые, хромокремненикелемедистые и т. д. Наличие марганца в сталях повышает ударную вязкость и хладноломкость, обеспечивая удовлетворительную свариваемость. По сравнению с другими низколегированными сталями марганцовистые стали позволяют получать сварные соединения более высокой прочности при знакопеременных и ударных нагрузках. Введение в низколегированные стали небольшого количества меди (0,3—0,4%) повышает стойкость стали против коррозии (атмосферной и в морской воде). Для изготовления сварных конструкций низколегированные стали используют в горячекатаном состоянии. Термическая обработка улучшает механические свойства стали, которые, однако, зависят от толщины проката. Особенно важно, что при этом может быть достигнуто значительное снижение температуры порога хладноломкости. Поэтому некоторые марки низколегированных сталей для производства сварных конструкций используют после упрочняющей термической обработки.

2. Механические свойства некоторых низкоуглеродистых сталей в холодном состоянии

Марка стали	$\sigma_в$, кгс/мм²	$\sigma_т$, кгс/мм² (не менее), для толщин, мм				δ_5, % (не менее), для толщин, мм			Изгиб на 180°, для толщин до 20 мм
		До 20	20—40	40—100	Св. 100	До 20	20—40	Св. 40	
ВСт1кп	31—40	—	—	—	—	35	34	32	$d = 0$
ВСт1пс ВСт1сп	32—42	—	—	—	—	34	33	31	(без оправки)
ВСт2кп	33—42	22	21	20	19	33	32	30	$d = 0$ (без оправки)
ВСт2пс ВСт2сп	34—44	23	22	21	20	32	31	29	
ВСт3кп	37—47	24	23	22	20	27	26	24	$d = 0{,}5a$
ВСт3пс ВСт3сп	38—49	25	24	23	21	26	25	23	
ВСт3Гпс	38—50	25	24	23	21	26	25	23	
10	34	21				31			
15	38	23				27			
20	42	25	—	—	—	25	—	—	—
15Г	42	25				26			
20Г	46	28				24			

Примечания: 1. Для сталей марок 10, 15, 20, 15Г и 20Г на образцах из нормализованных заготовок.

2. При изгибе образца из углеродистой стали обыкновенного качества толщиной св. 20 мм на 180° диаметр d оправки увеличивается на толщину a образца.

3. Ударная вязкость некоторых низкоуглеродистых конструкционных сталей

Марка стали	Вид проката	Расположение образца относительно проката	Толщина, мм	$a_н$, кгс·м/см², не менее		
				при температуре, °С		после механического старения
				+20	—20	
ВСт3пс	Листовая сталь	Поперек	5—9	8	4	4
			10—25	7	3	3
			26—40	5	—	—
ВСт3сп	Широкополосная сталь	Вдоль	5—9	10	5	5
			10—25	8	3	3
			26—40	7	—	—
ВСт3Гпс	Листовая сталь	Поперек	5—9	8	4	4
			10—30	7	3	3
			31—40	5	—	—
	Широкополосная сталь	Вдоль	5—9	10	5	5
			10—30	8	3	3
			31—40	7	—	—

4. Химический состав некоторых низкоуглеродистых низколегированных конструкционных сталей

Марка стали	Химический состав				Тип стали
	C	Si	Mn	Прочие	
14Г	0,12—0,18	0,17—0,37	0,7—1,0	—	Марганцовистые
19Г	0,16—0,22	0,17—0,37	0,8—1,15	—	
09Г2	⩽ 0,12	0,17—0,37	1,4—1,8	—	
14Г2	0,12—0,18	0,17—0,37	1,2—1,6	⩽0,3 Cr	
18Г2	0,14—0,20	0,25—0,55	1,2—1,6	⩽0,3 Ni	
12ГС	0,09—0,15	0,5—0,8	0,8—1,2	⩽0,3 Cu	Кремнемарганцовистые
16ГС	0,12—0,18	0,4—0,7	0,9—1,2	—	
17ГС	0,14—0,20	0,4—0,6	1,0—1,4	—	
09Г2С	⩽0,12	0,5—0,8	1,3—1,7	—	
10Г2С1	⩽0,12	0,9—1,2	1,3—1,65	—	
10Г2С1Д	⩽0,12	0,8—1,1	1,3—1,65	0,15—0,3 Cu ⩽0,3 Ni	Кремнемарганцево-меднистые
15ГФ	0,12—0,18	0,17—0,37	0,9—1,2	0,05—0,10 V	Марганцово-ванадиевая
14ХГС	0,11—0,16	0,4—0,7	0,9—1,3	0,5—0,8 Cr; ⩽0,3 N; ⩽0,3 Cu	Хромокремне-марганцовая
10ХСНД	⩽0,12	0,8—1,1	0,5—0,8	0,6—0,9 Cr; 0,5—0,8 Ni; 0,4—0,65 Cu	Хромокремне-никелемедистые
15ХСНД	0,12—0,18	0,4—0,7	0,4—0,7	0,6—0,9 Cr; 0,3—0,6 Ni; 0,2—0,4 Cu	Хромокремненикеле-медистые

5. Механические свойства некоторых марок низкоуглеродистых низколегированных конструкционных сталей в состоянии поставки

Марка стали	$a_н$, кгс·м/см², при температуре —40°С	$\sigma_в$, кгс/мм², не менее	$\sigma_т$, кгс/мм², не менее	δ_5, %
14Г	3,5	46	29	21
19Г	3,5	48	32	22
09Г2	3,0	45	31	21
14Г2	3,5	47	34	21
18Г2	4,0	52	36	21
12ГС	—	47	32	26
16ГС	4,0	50	33	21
09Г2С	4,0	50	35	21
10Г2С1	4,0	52	38	21
15ГФ	4,0	52	38	21
10Г2С1Д	—	50	35	18
14ХГС	4,0	50	35	22
10ХСНД	5,0	54	40	19
15ХСНД	3,0	50	35	21

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СВАРИВАЕМОСТИ

Рассматриваемые стали обладают хорошей свариваемостью. Технология их сварки должна обеспечивать определенный компелкс требований, основными из которых являются равнопрочность сварного соединения с основным металлом и

отсутствие дефектов в сварном шве. Для этого механические свойства металла шва и околошовной зоны должны быть не ниже нижнего предела механических свойств основного металла. В некоторых случаях конкретные условия работы конструкций допускают снижение отдельных показателей механических свойств сварного соединения. Однако в большинстве случаев, особенно при сварке ответственных конструкций, швы не должны иметь трещин, непроваров, пор, подрезов. Геометрические размеры и форма швов должны соответствовать требуемым. Сварное соединение должно быть стойким против перехода в хрупкое состояние. В отдельных случаях к сварному соединению предъявляют дополнительные требования (работоспособность при вибрационных и ударных нагрузках, пониженных температурах и т. д.). Однако во всех случаях технология должна обеспечивать максимальную производительность и экономичность процесса сварки при требуемой надежности и долговечности конструкции.

Механические свойства металла шва и сварного соединения зависят от его структуры, которая определяется химическим составом, режимом сварки и предыдущей и последующей термической обработкой. Химический состав металла шва зависит от доли участия основного и электродного металлов в образовании шва и взаимодействий между металлом и шлаком и газовой фазой. При сварке рассматриваемых сталей состав металла шва незначительно отличается от состава основного металла (табл. 6). В металле шва меньше углерода для предупреждения образования структур закалочного характера при повышенных скоростях охлаждения. Возможное снижение прочности металла шва, вызванное уменьшением содержания углерода, компенсируется легированием металла через проволоку, покрытие или флюс марганцем и кремнием. При сварке низколегированных сталей необходимое количество легирующих элементов в металле шва обеспечивается также и путем их перехода из основного металла.

6. Средний химический состав металла шва, %

Металл	C	Si	Mn
Основной металл типа ВСт3	0,14—0,22	0,05—0,30	0,40—0,45
Металл шва при сварке:			
покрытыми электродами	0,08—0,13	0,20—0,25	0,30—0,90
под флюсом	0,12—0,18	0,15—0,40	0,65—0,75
в среде углекислого газа	0,10—0,16	0,20—0,47	0,57—0,79
электрошлаковой	0,10—0,16	0,07—0,16	0,45—0,60
Основной металл — низколегированная сталь типа 19Г	0,16—0,22	0,17—0,37	0,80—1,15
Металл шва при сварке:			
покрытыми электродами	0,09—0,15	0,20—0,30	0,40—1,20
под флюсом	0,10—0,14	0,15—0,30	0,90—1,80

Повышенные скорости охлаждения металла шва способствуют увеличению его прочности (рис. 1), однако при этом снижаются пластические свойства и ударная вязкость. Это объясняется изменением количества и строения перлитной фазы. Скорость охлаждения металла шва определяется толщиной свариваемого металла, конструкцией сварного соединения, режимом сварки и начальной температурой изделия. Влияние скорости охлаждения в наибольшей степени проявляется при дуговой сварке однослойных угловых швов и последнего слоя многослойных угловых и стыковых швов при наложении их на холодные, предварительно сваренные швы. Металл многослойных швов, кроме последних слоев, подвергающийся действию повторного термического цикла сварки, имеет более благоприятную мелкозернистую структуру. Поэтому он обладает более низкой критической температурой перехода в хрупкое состояние. Пластическая деформация, возникающая в металле шва под действием сварочных напряжений, также повышает предел текучести металла шва. Свойства сварного соединения зависят

не только от свойств металла шва, но и от свойств основного металла в околошовной зоне. Структура, а значит и свойства основного металла в околошовной зоне, зависят от его химического состава и изменяются в зависимости от термического цикла сварки. На рис. 2 слева схематически показаны кривая распределения температур по поверхности сварного соединения в один из моментов, когда металл шва находится в расплавленном состоянии, и структурные участки зоны термического влияния на низкоуглеродистых и низколегированных сталях при дуговой сварке.

При сварке низкоуглеродистых сталей на участке неполного расплавления металл нагревается в интервале температур между линиями солидуса и ликвидуса,

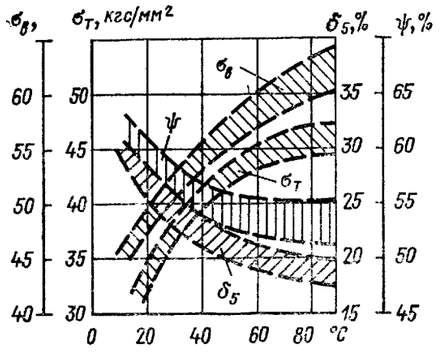


Рис. 1. Зависимость механических свойств металла шва от скорости охлаждения при дуговой сварке низкоуглеродистых сталей

что приводит к частичному расплавлению (оплавлению) зерен металла. Пространство между нерасплавившимися зернами заполняется жидкими прослойками расплавленного металла, который может содержать элементы, вводимые в металл сварочной ванны. Это может привести к тому, что состав металла на этом участке будет отличаться от состава основного металла, а из-за нерасплавившихся зерен основного металла — и от состава наплавляемого металла. Увеличению химической неоднородности металла на этом участке способствует и слоистая ликвация, а также диффузия элементов, которая может происходить как из основного нерасплавившегося металла в жидкий металл, так и наоборот. По существу этот участок и является местом сварки. Несмотря на его небольшую протяженность, свойства металла в нем могут влиять на свойства всего сварного соединения.

На участке перегрева в результате нагрева в интервале температур от 1100—1150° С до температур линии солидуса металл полностью переходит в состояние аустенита. При этом происходит рост зерна, размеры которого увеличиваются тем более, чем выше нагрет металл выше температуры точки Ac_3. Даже непродолжительное пребывание металла при температурах свыше 1100° С приводит к значительному увеличению размера зерен. После охлаждения это может привести к образованию неблагоприятной видманштеттовой структуры. На участке нормализации (полной перекристаллизации) металл нагревается незначительно выше температур точки Ac_3, и поэтому он имеет мелкозернистую структуру с высокими механическими свойствами. На участке неполной перекристаллизации металл нагревается до температур между точками Ac_1 и Ac_3, поэтому этот участок характеризуется почти неизменившимися первоначальными ферритными и перлитными зернами и более мелкими зернами феррита и перлита после перекристаллизации, а также сфероидизацией перлитных участков.

На участке рекристаллизации металл нагревается в интервале температур от 500—550° С до температуры точки Ac_1, и поэтому по структуре он незначительно отличается от основного. Если до сварки металл подвергается пластической деформации, то при нагреве в нем происходит сращивание раздробленных зерен основного металла — рекристаллизация. При значительной выдержке при этих температурах может произойти значительный рост зерен. Механические свойства металла этого участка могут несколько снизиться вследствие разупрочнения из-за снятия наклепа.

При нагреве металла в интервале температур от 100 до 500° С (участок синеломкости) его структура в процессе сварки не претерпевает видимых изменений.

Однако металл на этом участке может обладать пониженной пластичностью и несколько повышенной прочностью. У некоторых сталей, содержащих повышенное количество кислорода и азота (обычно кипящих), металл на этом участке имеет резко сниженную ударную вязкость и сопротивляемость разрушению.

При многослойной сварке, ввиду многократного воздействия термического цикла сварки на основной металл в околошовной зоне, строение и структура зоны термического влияния несколько зименяются. При сварке длинными участками

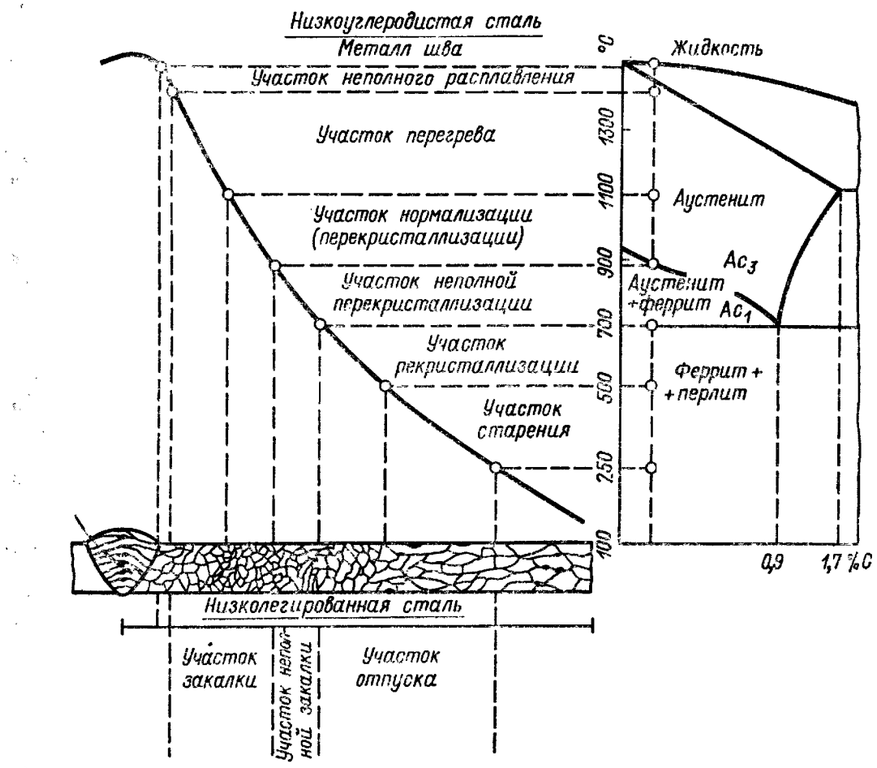


Рис. 2. Схема строения зоны термического влияния сварного шва при дуговой сварке

после каждого последующего прохода предыдущий шов подвергается своеобразному отпуску. При сварке короткими участками шов и околошовная зона длительное время находятся в нагретом состоянии. Кроме изменения структур, это увеличивает и протяженность зоны термического влияния. Наличие в низколегированных сталях легирующих элементов (которые растворяются в феррите и измельчают перлитную составляющую) тормозит при охлаждении процесс распада аустенита и действует равносильно некоторому увеличению скорости охлаждения. Поэтому при сварке в зоне термического влияния (см. рис. 2) на участках, где металл нагревается выше температур точки Ac_1 (при повышенных скоростях охлаждения), могут образовываться закалочные структуры. При этом металл, нагревающийся до температур значительно выше температуры точки Ac_3, будет иметь более грубозернистую структуру. При сварке термических упрочненных сталей на участках рекристаллизации и синеломкости может произойти

отпуск металла, характеризующийся структурой сорбита отпуска, с понижением его прочностных свойств. Технология изготовления сварных конструкций из низколегированных сталей должна предусматривать минимальную возможность появления в зоне термического влияния закалочных структур, способных привести к холодным трещинам, особенно при сварке металла больших толщин. При сварке термически упрочненных сталей следует принять меры, предупреждающие разупрочнение стали на участке отпуска.

При электрошлаковой сварке структура металла швов может характеризоваться наличием зоны *1* крупных столбчатых кристаллов (рис. 3, *а*), которые растут в направлении, обратном отводу тепла, зоны *2* тонких столбчатых кристаллов, характеризуемой меньшей величиной зерна и несколько большим их отклонением в сторону теплового центра, и зоны *3* равноосных кристаллов, располагающейся посередине шва. Строение швов зависит от способа электрошлаковой сварки, химического состава металла шва и режима сварки. Повышение содержания в шве углерода и марганца увеличивает, а уменьшение интенсивности теплоотвода, наоборот, уменьшает ширину зоны *1*. При сварке проволочными электродами могут быть только первые две зоны (рис. 3, *б*) или какая-либо одна из них. Металл швов, имеющих структуру зоны *2*, имеет пониженную стойкость против кристаллизационных трещин. Медленное охлаждение швов при электрошлаковой сварке в интервале температур фазовых превращений способствует тому, что их структура характеризуется грубым ферритно-перлитным строением с утолщенной оторочкой феррита по границам кристаллов. Термический цикл околошовной зоны при электрошлаковой сварке характеризуется ее длительным нагревом и выдержкой при температурах перегрева и медленным охлаждением. Поэтому в ней могут образовываться грубые видманштеттовы структуры, которые по мере удаления от линии сплавления сменяются нормализованной мелкозернистой структурой. В зоне перегрева может наблюдаться падение ударной вязкости, что устраняется последующей термической обработкой (нормализация с отпуском). Термический цикл электрошлаковой сварки, способствуя распаду аустенита в области перлитного и промежуточного превращений, благоприятен при сварке низколегированных сталей, так как способствует подавлению образования закалочных структур.

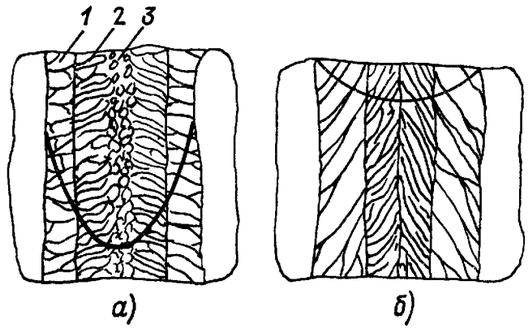


Рис. 3. Схема строения структур металла шва при электрошлаковой сварке

Основным фактором, определяющим после окончания сварки конечную структуру металла в отдельных участках зоны термического влияния, является термический цикл, которому подвергался металл в этом участке при сварке. Решающими факторами термического цикла сварки являются максимальная температура, достигаемая металлом в рассматриваемом объекте, и скорость его охлаждения. Ширина и конечная структура различных участков зоны термического влияния определяется способом и режимом сварки, составом и толщиной основного металла.

Рассмотренное выше разделение зоны термического влияния является приближенным. Переход от одного структурного участка к другому сопровождается промежуточными структурами. Кроме того, диаграмму железо — углерод мы рассматривали статично, в какой-то момент существования сварочной ванны. В действительности температура в точках зоны термического влияния изменяется во времени в соответствии с термическим циклом сварки.

Обеспечение равнопрочности сварного соединения при дуговой сварке низкоуглеродистых и низколегированных нетермоупрочненных сталей обычно не вызывает затруднений. Механические свойства металла околошовной зоны зависят от конкретных условий сварки и от вида термической обработки стали до сварки. При сварке низкоуглеродистых горячекатаных (в состоянии поставки) сталей при толщине металла до 15 мм на обычных режимах, обеспечивающих небольшие скорости охлаждения, структуры металла шва и околошовной зоны примерно такие, какие были рассмотрены выше. Повышение скоростей охлаждения при сварке на форсированных режимах металла повышенной толщины, а также однопроходных угловых швов при отрицательных температурах и т. д. может привести к появлению в металле шва и на участках перегрева полной и неполной рекристаллизации в околошовной зоне закалочных структур. Повышение содержания в стали марганца увеличивает эту вероятность. При этих условиях даже при сварке горячекатаной низкоуглеродистой стали марки ВСт3 не исключена возможность получения в сварном соединении закалочных структур. Если эта сталь перед сваркой прошла термическое упрочнение — закалку, то в зоне термического влияния шва на участках рекристаллизации и синеломкости будет наблюдаться отпуск металла, т. е. снижение его прочностных свойств. Изменение этих свойств зависит от погонной энергии, типа сварного соединения и условий сварки.

Изменение свойств металла шва и околошовной зоны при сварке низколегированных сталей проявляется более значительно. Сварка горячекатаной стали способствует появлению закалочных структур на участках перегрева и нормализации. Механические свойства металла изменяются больше, чем при сварке низкоуглеродистых сталей. Термическая обработка низколегированных сталей — чаще всего закалка (термоупрочнение) с целью повышения их прочности при сохранении высокой пластичности, усложняет технологию их сварки. На участках рекристаллизации и синеломкости происходит разупрочнение стали под действием высокого отпуска с образованием структур преимущественно троостита или сорбита отпуска. Это разупрочнение тем больше, чем выше прочность основного металла в результате закалки. В этих процессах решающее значение имеет скорость охлаждения металла шва и в первую очередь погонная энергия при сварке (табл. 7). Повышение погонной энергии сварки (рис. 4) сопровождается снижением твердости и расширением разупрочненной зоны. Околошовная зона, где наиболее резко выражены явления перегрева и закалки, служит вероятным местом образования холодных трещин при сварке низколегированных сталей.

7. Влияние погонной энергии сварки на предел прочности сварных соединений термоупрочненной стали 14ХГС

Толщина стали, мм	$\sigma_в$, кгс/мм²		
	стали	сварного соединения при сварке с q/v, кал/см	
		4000	2000
12	93,5	65,1	73,6
20	100,9	73,4	77,6

Таким образом, получение при сварке низколегированных сталей, особенно термоупрочненных, равнопрочного сварного соединения вызывает некоторые трудности и поэтому требует применения определенных технологических приемов (сварка короткими участками нетермоупрочненных сталей и длинными участками термоупрочненных и др.) Протяженность участков зоны термического влияния, где произошло изменение свойств основного металла под действием термического цикла сварки (разупрочнение или закалка), зависит от способа и режима сварки, состава и толщины металла, конструкции сварного соединения и др.

В процессе изготовления конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей на заготовительных операциях и при сварке в зонах, удаленных от высокотемпературной области, возникает холодная пластическая деформация. Попадая при наложении последующих швов под сварочный нагрев до температур около 300° С, эти зоны становятся участками деформационного старения, приводящего к снижению пластических и повышению прочностных свойств

металла и возможному возникновению холодных трещин, особенно при низких температурах или в местах концентрации напряжений. Высокий отпуск при 600—650° С в этих случаях является эффективным средством восстановления свойств металла (рис. 5). Высокий отпуск применяют и для снятия сварочных напряжений.

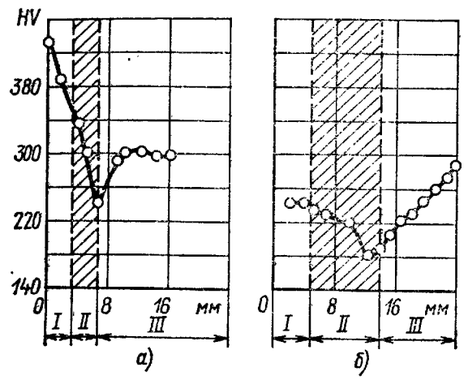


Рис. 4. Влияние погонной энергии на распределение твердости металла по поперечному сечению шва на стали 14ХГС:

а) q/v = 2100 кал/см; *б*) q/v = 11800 кал/см; *I* — шов; *II* — зона перекристаллизации; *III* — основной металл

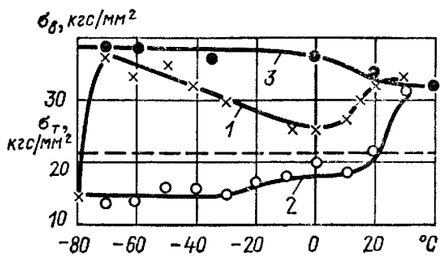


Рис. 5. Свойства стали ВСт3кп в зависимости от термической обработки и деформационного старения:

1 — в исходном горячекатаном состоянии; *2* — после 10%-ной деформации растяжением при 250° С; *3* — то же и последующий отпуск при 650° С

Нормализации подвергают сварные конструкции для улучшения структуры отдельных участков сварного соединения и выравнивания их свойств. Термическая обработка, кроме закалки сварных соединений в тех участках соединения, которые охлаждались с повышенными скоростями, приведшими к образованию в них неравновесных структур закалочного характера (угловые однослойные швы, последние проходы, выполненные на полностью остывших предыдущих), снижает прочностные и повышает пластические свойства металла в этих участках (табл. 8). При сварке короткими участками по горячим, предварительно наложенным швам замедленная скорость охлаждения металла шва и околошовной зоны способствует получению равновесных структур. Влияние термической обработки в этом случае сказывается незначительно. При электрошлаковой сварке последующая термическая обработка мало изменяет механические свойства металла рассматриваемых зон. Однако нормализация приводит к резкому возрастанию ударной вязкости.

Швы, сваренные на низкоуглеродистых сталях всеми способами сварки, обладают удовлетворительной стойкостью против образования кристаллизационных трещин. Это обусловлено низким содержанием в них углерода. Однако при сварке на низкоуглеродистых сталях, содержащих углерод по верхнему пределу (свыше 0,20%), угловых швов и первого корневого шва в многослойных швах, особенно с повышенным зазором, возможно образование в металле шва кристаллизационных трещин, что связано в основном с неблагоприятной формой провара (узкой, глубокой). Легирующие добавки в низколегированных сталях могут повышать вероятность образования кристаллизационных трещин. Все низкоуглеродистые и низколегированные стали хорошо свариваются всеми способами сварки плавлением. Обычно не имеется затруднений, связанных с возможностью образования холодных трещин, вызванных образованием в шве или околошовной зоне закалочных структур. Однако в сталях, содержащих углерод по верхнему пределу и повышенное содержание марганца и хрома, вероятность образования холодных трещин в указанных зонах повышается, особенно с ростом скорости

охлаждения (повышение толщины металла, сварка при отрицательных температурах, сварка швами малого сечения и др.). В этих условиях предупреждение трещин достигается предварительным подогревом до 120—200° С. Предварительная и послелующая термическая обработка сталей, использующихся в ответственных конструкциях, служит для этой цели, а также позволяет получить необходимые механические свойства сварных соединений (высокую прочность или пластичность, или их необходимое сочетание).

8. Влияние термической обработки на механические свойства металла шва при сварке низкоуглеродистой стали

Механические свойства	После сварки	Сварка и отпуск при 660°С	Сварка и нормализация	Сварка и отжиг	Сварка и закалка
$\sigma_т$, кгс/мм²	31,4 / 32,5	26,7 / 31,8	24 / 30,7	23 / —	34,9 / —
$\sigma_в$, кгс/мм²	46,3 / 46,7	43,3 / 46,3	38,2 / 46,4	39,6 / —	54,4 / —
δ_5, %	25,5 / 23,3	33,1 / 24,1	35,1 / 34,7	35,3 / —	24,4 / —
ψ, %	62,2 / 56	69,9 / 56,8	71,2 / 57,3	71,5 / —	— / —
$a_н$, кгс·м/см²	10,5 / 8,2	12,5 / 7,9	15,7 / 17,9	13,4 / —	8,0 / —

Примечания: 1. В числителе приведены механические свойства последнего шва при многослойной автоматической сварке под флюсом; в знаменателе — механические свойства металла шва при электрошлаковой сварке.
2. Состав металла шва при сварке под флюсом — 0,12% С; 0,75% Mn; 0,22% Si; при электрошлаковой сварке — 0,14% С; 0,8% Mn; 0,07% Si.

Подготовку кромок и сборку соединения под сварку производят в зависимости от толщины металла, типа соединения и способа сварки согласно соответствующим ГОСТам или техническим условиям. Свариваемые детали для фиксации положения кромок относительно друг друга и выдерживания необходимых зазоров перед сваркой собирают в универсальных или специальных сборочных приспособлениях или с помощью прихваток. Длина прихватки зависит от толщины металла и изменяется в пределах 20—120 мм при расстоянии между ними 500—800 мм. Сечение прихваток равно примерно $^1/_3$ сечения шва, но не более 25—30 мм². Прихватки выполняют покрытыми электродами или на полуавтоматах в углекислом газе. При сварке прихватки следует переплавлять полностью, так как в них могут образовываться трещины из-за высокой скорости теплоотвода. Перед сваркой прихватки тщательно зачищают и осматривают. При наличии в прихватке трещины ее вырубают или удаляют другим способом. При электрошлаковой сварке детали, как правило, устанавливают с зазором, расширяющимся к концу шва. Фиксацию взаимного положения деталей производят скобами, установленными на расстоянии 500—1000 мм друг от друга, удаляемыми по мере наложения шва. При автоматических способах дуговой и электрошлаковой сварки в начале и конце шва устанавливают заходные и выходные планки.

Сварка стыковых швов вручную или полуавтоматами в защитных газах и порошковыми проволоками выполняется на весу. При автоматической сварке требуются приемы, обеспечивающие предупреждение прожогов и качественный провар корня шва. Это достигается применением остающихся или съемных подкладок, ручной или полуавтоматической в среде защитных газов подварки корня шва, флюсовой подушки и других приемов. Для предупреждения образования в швах пор, трещин, непроваров и других дефектов свариваемые кромки перед сваркой тщательно зачищают от шлака, оставшегося после термической резки, ржавчины, масла и других загрязнений. Дуговую сварку ответственных конструкций лучше производить с двух сторон. Выбор способа заполнения разделки при многослойной сварке зависит от толщины металла и термической обработки стали перед сваркой. При появлении в швах дефектов (пор, трещин, непроваров,

Тип электрода по ГОСТ 9467—75	Марка электрода	$\sigma_т$, кгс/мм²	$\sigma_в$, кгс/мм²	δ, %	ψ, %	$a_н$, кгс·м/см², при температуре, °С: +20	$a_н$, кгс·м/см², при температуре, °С: —40	Угол загиба α, град	Типичный коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Род тока	Основное назначение электродов
Э42	ОММ-5	37	48	22	55	10,0	5,0	160	7,2	Постоянный	Сварка ответственных конструкций из низкоуглеродистых сталей
	СМ-5	32	46	25	60	12,0	8,0	180	7,2	Постоянный и переменный	Сварка конструкций из низкоуглеродистых сталей
	ЦМ-7	36	48	22	55	10	4,0	160	10,6	Постоянный и переменный	Сварка низкоуглеродистых сталей
	КПЗ-32Р	38	47	22	45	10	—	180	8,0		То же
	УНЛ-1	—	48	23	—	12,3	9,5	160	8,0		Сварка низкоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей с $\sigma_т = 38$ кгс/мм²
	АНО-5	35,0	47,0	25,0	60,0	14,0	8,0	180	11,0	Постоянный и переменный	Сварка низкоуглеродистых сталей
	АНО-6	33,0	45,0	26,0	60,0	14,0	8,0	180	8,5		То же
	АНО-1	38,0	46,0	28,0	60,0	13,0	8,0	180	15,0		Сварка низкоуглеродистых и некоторых низколегированных сталей
	ОМА-2	—	46,0	19,0	—	—	—	150	10,0	Постоянный и переменный	Сварка низкоуглеродистых и низколегированных сталей малых толщин
	ВСП-1	38,5	47,0	25,0	68,0	13,0	—	160	10,0	То же	Сварка низкоуглеродистых и низколегированных сталей
	ВСЦ-2	37,0	47,0	28,0	60,0	9,0	—	180	10,5	Постоянный любой полярности	То же
Э42А	УОНИ-13/45	36,0	46,0	26,0	65,0	22,0	18,0	180	8,5	Постоянный обратной полярности	Сварка наиболее ответственных и напряженных конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей
	СМ-11	36,0	48,0	28,0	60,0	22,0	16,0	—	9,5	Постоянный обратной полярности или переменный	Сварка ответственных конструкций из низколегированных и низкоуглеродистых сталей
	УП-1/45	35,0	48,0	28,0	65,0	20,0	12,0	180	10,0		Сварка наиболее ответственных конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей
	УП-2/45	38,0	46,0	26,0	70,0	24,0	—	180	10,0		То же
	ОЗС-2	38,0	46,0	24,0	55,0	18,0	—	180	8,5		»
Э46	АНО-3	38	48	25	65	15	10	180	8,5	Постоянный и переменный	Сварка низкоуглеродистых сталей
	АНО-4	37	48	25	65	15	10	180	8,3	То же	То же
	МР-1	38	48	25	65	15	10	180	8,5	»	»
	МР-3	38	48	25	65	15	10	180	7,8	Постоянный обратной полярности и переменный	Сварка ответственных конструкций из низкоуглеродистых сталей
	ОЗС-4	39	48	23	55	12	8	180	8,5	Постоянный и переменный	Сварка низкоуглеродистых сталей
	ОЗС-6	39	48	24	55	12	8	180	10,5	То же	То же
	РБУ-4	38,5	49	26	56	14	8	160	7,8	Постоянный обратной полярности и переменный	»
	РБУ-5	38	47,5	21	56	14	8	150	9,0	Постоянный и переменный	»

Тип электрода по ГОСТ 9467—75	Марка электрода	Временное сопротивление разрыву, кгс/мм²		Относительное удлинение, %		Ударная вязкость, кгс·м/см², при температуре, °С		Угол загиба α, град	Коэффициент наплавки, г/(А·ч)	Род тока	Основные назначения электродов
						+20	−40				
Э46	ОЗС-3	40	49	25	60	12	7	180	15,0	Постоянный обратной полярности и переменный	Сварка низкоуглеродистых сталей
	ЗРС-1	38	48	24	68	12	7	150	14,0	Постоянный и переменный	Сварка ответственных конструкций из низкоуглеродистых сталей
Э46А	Э-138/45Н	35	47	22	—	15	>3	180	8,5	Постоянный обратной полярности	Сварка низкоуглеродистых и низколегированных сталей при постройке и ремонте судов. Обеспечивают высокую коррозионную стойкость сварных соединений в морской воде
Э50	ВСЦ-3	41	51	21	57	—	—	105	13—прямая полярность, 9,5—обратная	Постоянный любой полярности	Сварка стыков магистральных трубопроводов (кроме первого и последнего слоев, сварку которых производят электродами ВСЦ-2)
	ВСН-3	—	50	16	—	10	3 при −70°С	100	9,0	Постоянный обратной полярности	Сварка трубопроводов из стали 10Г2, работающих при температурах до −70°С
	УОНИ-13/55	42	52	24	62	20	—	165	9,0	Постоянный обратной полярности	Сварка ответственных конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей
	ДСК-50	—	52,0	28,6	—	20	14	180	10,0	Постоянный обратной полярности и переменный	Сварка низколегированных сталей 14ХГС, 15ХСНД
Э50	УП-1/55	40	54	25	62,5	24	—	165	10,0	Постоянный обратной полярности и переменный	Сварка ответственных конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей
	УП-2/55	40	54	25	62	24	—	165	10,0	То же	То же
	К-5А	—	52,0	24	—	15	—	165	9,0	»	Сварка низкоуглеродистых и низколегированных сталей
Э50А	Э-138/50Н	41	51	24	—	15,5	>3	165	9,0	Постоянный обратной полярности	Сварка наружных швов подводной части корпусов судов из низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Обеспечивают коррозионную стойкость в морской воде, равную стойкости свариваемого материала
	АН-Х7	37	52,5	24	—	15	>3	165	9,8	То же	Сварка швов наружной обшивки морских судов из низколегированных сталей. Металл шва по коррозионной стойкости в морской воде близок к основному
Э55	УОНИ-13/55У	48,0	57	22	60	16	—	160	9,5	Постоянный обратной полярности	Сварка ванным способом стержней арматуры из низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Могут быть использованы также для обычной дуговой сварки ответственных конструкций из низколегированных сталей
Э60	УОНИ-13/65	47	62	21	65	18	—	180	9,8	Постоянный обратной полярности	Сварка низколегированных хромистых, хромомолибденовых и хромокремнисто-

подрезов и т. д.) металл в месте дефекта удаляют механическим путем или воздушно-дуговой или плазменной резкой и после зачистки подваривают. При сварке низколегированных сталей от выбора техники и режима сварки (при изменении формы провара и доли участия основного металла в формировании шва) зависят состав и свойства металла шва.

РУЧНАЯ ДУГОВАЯ СВАРКА ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Электроды выбирают в зависимости от назначения конструкций и типа стали (табл. 9), а режим сварки — в зависимости от толщины металла, типа сварного соединения и пространственного положения сварки.

Диаметр электрода зависит от толщины свариваемого металла:

Толщина металла, мм	0,5—1,0	1,0—2,0	2,0—5,0	5,0—10,0	10,0 и выше
Диаметр электрода, мм	1,0—1,5	1,5—2,5	2,5—4,0	4,0—5,0	5,0—8,0

Рекомендуемые для электрода данной марки значения сварочного тока, его род и полярность выбирают согласно паспорту электрода, в котором приводят его сварочно-технологические свойства, типичный химический состав шва и механические свойства. При сварке рассматриваемых сталей обеспечиваются высокие механические свойства сварного соединения и поэтому в большинстве случаев не требуются специальные меры, направленные на предотвращение образования в нем закалочных структур. Однако при сварке угловых швов на толстом металле и первого слоя многослойного шва для повышения стойкости металла против трещин рекомендуется предварительный подогрев до 120—150° С.

Техника заполнения швов и определяемый ею термический цикл сварки зависят от предварительной термической обработки стали. Сварка толстого металла каскадом и горкой, замедляя скорость охлаждения металла шва и околошовной зоны, предупреждает образование в них закалочных структур. Это же достигается при предварительном подогреве до 150—200° С. Поэтому эти способы дают благоприятные результаты на нетермоупрочненных сталях. При сварке термоупрочненных сталей для уменьшения разупрочнения стали в околошовной зоне рекомендуется сварка длинными швами по охлажденным предыдущим швам. Следует выбирать режимы сварки с малой погонной энергией. При этом достигается и уменьшение протяженности зоны разупрочненного металла в околошовной зоне. При исправлении дефектов в сварных швах на низколегированных и низкоуглеродистых сталях повышенной толщины швами малого сечения вследствие значительной скорости остывания металл подварочного шва и его околошовная зона обладают пониженными пластическими свойствами. Поэтому подварку дефектных участков следует производить швами нормального сечения длиной не менее 100 мм или предварительно подогревать их до 150—200° С.

Сварка под флюсом

Автоматическую сварку выполняют электродной проволокой диаметром 3—5 мм, полуавтоматическую — диаметром 1,2—2 мм. Равнопрочность соединения достигается подбором флюсов и сварочных проволок (табл. 10) и выбором режимов и техники сварки. При сварке низкоуглеродистых сталей в большинстве случаев применяют флюсы АН-348-А и ОСЦ-45 и низкоуглеродистые электродные проволоки Св-08 и Св-08А. При сварке ответственных конструкций, а также ржавого металла рекомендуется использовать электродную проволоку Св-08ГА. Использование указанных материалов позволяет получить металл шва с механическими

свойствами, равными или превышающими механические свойства основного металла. При сварке низколегированных сталей используют те же флюсы и электродные проволоки Св-08ГА, Св-10ГА, Св-10Г2 и др. Легирование металла шва марганцем из проволок и кремнием при проваре основного металла, при подборе соответствующего термического цикла (погонной энергии) позволяет получить металл шва с требуемыми механическими свойствами. Использованием указанных материалов достигается высокая стойкость металла швов против образования пор и кристаллизационных трещин. При сварке без разделки кромок увеличение доли основного металла в металле шва и поэтому некоторое повышение в нем углерода может повысить прочностные свойства и понизить пластические свойства металла шва.

10. Материалы для сварки под флюсом низкоуглеродистых и низколегированных сталей

Марка или тип стали	Сварочная проволока (ГОСТ 2246—70)	Марка плавленного флюса (ГОСТ 9087—69)
ВСт1 — ВСт3	Св-08, Св-08А, в ответственных конструкциях Св-08ГА	АН-348-А, ОСЦ-45, ФЦ-9 и керамические К-11 и КВС-19
09Г2	Св-08ГА	АН-22
12ГС, 16ГС, 10Г2С1, 17ГС, 17Г1С	Св-08ГСМТ (для стали 12ГС также Св-10ГА)	АН-60
09Г2С	Св-08ГА, Св-10НМА, Св-10ГА	АН-22
10ХСНД	Св-08ГСМТ	АН-348-А
15ХСНД	Св-10Г2, Св-08ХГСМА	АН-348-А, АН-22

Режимы сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей различаются незначительно и зависят от конструкции соединения, типа шва и техники сварки (табл. 11—15). Свойства металла околошовной зоны зависят от термического цикла сварки. При сварке угловых однослойных швов и стыковых и угловых швов на толстой стали типа ВСт3 на режимах с малой погонной энергией в околошовной зоне возможно образование закалочных структур с пониженной пластичностью. Предупреждение этого достигается увеличением сечения швов или применением двухдуговой сварки.

Толщина более толстого листа, мм	8—10	10—22	24—60
Сечение части металла шва или слоя, образованного из электродного металла, мм	25	35	50

При сварке низколегированных термоупрочненных сталей для предупреждения разупрочнения шва в зоне термического влияния следует использовать режимы с малой погонной энергией, а при сварке не термоупрочненных сталей — режимы с повышенной погонной энергией. Для обеспечения пластических свойств металла шва и околошовной зоны на уровне свойств основного металла во втором случае следует выбирать режимы, обеспечивающие получение швов повышенного сечения, применять двухдуговую сварку или производить предварительный подогрев металла до 150—200° С.

В зависимости от условий сварки и охлаждения свойства сварных соединений на низкоуглеродистых и низколегированных сталях изменяются в широких пределах (табл. 16).

11. Режимы автоматической сварки под флюсом стыковых швов без разделки кромок с обязательным зазором на флюсовой подушке

Толщина металла, мм	Зазор, мм	Шов	Диаметр электродной проволоки, мм	Ток, А	Напряжение дуги, В		Скорость сварки, м/ч
					Переменный ток	Постоянный ток (обратной полярности)	
3	0—1,5	Односторонний	2	250—300	28—30	26—28	48—50
5	0—2			400—450			38—40
8	2—4		4	550—600	28—32	26—30	48—50
		Двусторонний		650—700	32—36		30—32
10	1—3	Односторонний	5	700—750	34—38	30—34	28—30
		Двусторонний		650—700			32—34
			4	600—650			
12	4—5	Односторонний	5	750—800	36—40		25—27
	2—4	Двусторонний		650—700			30—32
			4				
14	4—6	Односторонний	5	850—900			25—27
	2—4	Двусторонний		700—750			28—30
			4	650—700			
16	5—7	Односторонний	5	900—950	38—42		20—22
	2—4	Двусторонний		700—750	36—40		27—29
			4				
20	5—7	Односторонний	5	950—1000	40—44	32—36	18—20
	2—4	Двусторонний		750—800	38—42		22—24
			4				
30	6—8	Двусторонний	5	950—1000	40—44	—	16—18
40	8—10	»		1100—1200			12—14
50	10—12	»		1200—1300	44—48		10—12

12. Режимы двусторонней сварки стыковых швов с V-образной разделкой кромок на флюсовой подушке

Толщина металла, мм	Шов	Слой	Диаметр сварочной проволоки, мм	Ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч
14	Основной Подварочный	Первый	5	850 750	36—38	36 53
16	Основной Подварочный			900 750		32 48
20	Основной Подварочный			1000 850	38—40 36—38	27 39

Продолжение табл. 12

Толщина металла, мм	Шов	Слой	Диаметр сварочной проволоки, мм	Ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч
24	Основной Подварочный	Первый	6	1100 1000	38—40	19 33
30	Основной Подварочный			1250 1050	40—44	14 27
34	Основной	Первый Второй		1100 1050	38—40	18 15
	Подварочный	Первый		1050		23

13. Режимы автоматической сварки под флюсом многослойных стыковых швов

Толщина металла, мм	Подготовка кромок	Слой	Диаметр электродной проволоки, мм	Ток, А	Род тока, полярность	Напряжение дуги, В	Примечание
Более 16	У-образная	Первый	4	750—800	Постоянный, обратной полярности	30—35	Первые два слоя сваривают на флюсовой подушке
			5		Переменный	35—40	
		Второй и последующие	4	800—900	Постоянный, обратной полярности	30—35	
			5		Переменный	35—40	
Более 22	Х-образная	Первый	4	750—800	Постоянный, обратной полярности	30—35	Вылет электрода 40—50 мм
			5		Переменный	35—40	
		Второй и последующие	4	800—900	Постоянный, обратной полярности	30—35	Число слоев в зависимости от толщины металла до полного заполнения разделки, но не менее двух слоев с каждой стороны
			5		Переменный		

Примечание. Скорость сварки 20—22 м/ч.

14. Режимы автоматической и полуавтоматической сварки под флюсом угловых швов «в лодочку»

Катет шва, мм	Диаметр электродной проволоки, мм	Ток, А	Напряжение дуги, В		Скорость сварки, м/ч
			Переменный ток	Постоянный ток обратной полярности	
6	2	350—400	32—34	30—32	26—28
	3	500—550	34—36	30—32	45—47
	4	550—600	34—38	30—34	52—54

Продолжение табл. 14

Катет шва, мм	Диаметр электродной проволоки, мм	Ток, А	Напряжение дуги, В		Скорость сварки, м/ч
			Переменный ток	Постоянный ток обратной полярности	
8	2 3	400—450 550—600	32—34 34—36	32—34	22—25 28—30
	4 5	550—650 675—725	34—38 32—34	32—36	30—32 32
10	2 3	400—450 600—650	34—36	32—34	12—15 20—22
	4 5	650—700 700—800	34—38	32—36	23 23—25
12	2	400—450	34—36	32—34	8—10
	4	600—650	34—38		18—20
	5	750—850		32—36	

15. Режимы автоматической и полуавтоматической сварки под флюсом угловых швов наклонным электродом (ток переменный или постоянный обратной полярности)

Катет шва, мм	Диаметр электродной проволоки, мм	Ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч
3	2	200—220	25—28	60
4	2 3	120—200 350—370	26—28 28—30	28—30 53—55
5	2 3 4	260—280 450—480 450—500	28—30	28—30 54—58 58—60
7	2 3	370—400 500—530	30—32	28—30 44—46
	4	650—700	32—34	48—50

16. Механические свойства металла швов, выполненных под флюсом

Сталь	Флюс	$\sigma_т$, кгс/мм²	$\sigma_в$, кгс/мм²	δ, %	$a_н$, кгс·м/см²
ВСт3сп 10ХСНД 17Г1С	АН-348-А АН-348-А АН-60	25—35 51 36,5	44—50 59,3 55,5	25—30 26,4 27,5	8—14 10,3 —

ДУГОВАЯ СВАРКА В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

При сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей для защиты расплавленного электродного металла и металла сварочной ванны используют углекислый газ. В качестве защитных находят применение и смеси углекислого газа с аргоном или кислородом до 30%. Аргон и гелий в качестве защитных газов применяют только при сварке конструкций ответственного назначения. Сварку в углекислом газе выполняют плавящимся электродом. В некоторых случаях для сварки используют неплавящийся угольный или графитовый электрод (табл. 17).

17. Режимы сварки бортовых соединений угольным электродом в углекислом газе

Толщина металла, мм	Ток, А	Скорость сварки, м/ч	Длина дуги	Вылет электрода	Диаметр электрода
			мм		
0,5 1,5 2,0	20—25 90—95 120—130	50—55 60—65 50—55	2—2,5 2—2,5 2—3	15—20 30—35 40—45	3 6 6

Этот способ применяют при сварке бортовых соединений из низкоуглеродистых сталей толщиной 0,3—2,0 мм (например, канистр, корпусов конденсаторов и т. д.). Так как сварку выполняют без присадки, содержание кремния и марганца в металле шва невелико. В результате прочность соединения составляет 50—70% прочности основного металла.

При автоматической и полуавтоматической сварке плавящимся электродом швов, расположенных в различных пространственных положениях, используют электродную проволоку диаметром до 1,2 мм, а при сварке швов, расположенных в нижнем положении — проволоку диаметром 1,2—3,0 мм.

Для сварки в углекислом газе низкоуглеродистых и низколегированных сталей рекомендуется следующая проволока:

Сталь	ВСт1, ВСт2	ВСт3	10ХСНД, 15ХСНД, 14ХГС, 09Г2, 14Г2 и им подобные
Проволока	Св-08ГС, Св-08Г2С, Св-12ГС	Св-08ГС, Св-08Г2С	Св-08Г2С (при одно- или двухслойной сварке), Св-08ХГ2С

Структура и свойства металла швов и околошовной зоны на низкоуглеродистых и низколегированных сталях зависят от использованной электродной проволоки, состава и свойств основного металла и режима сварки (термического цикла сварки, доли участия основного металла в формировании шва и формы шва). Влияние этих условий и технологические рекомендации примерно такие же, как и при ручной дуговой сварке и сварке под флюсом.

На свойства металла шва влияет качество углекислого газа. При повышенном содержании азота и водорода, а также влаги в газе в швах могут образовываться поры. При сварке в углекислом газе влияние ржавчины незначительно. Увеличение напряжения дуги, повышая угар легирующих элементов, ухудшает механические свойства шва. Некоторые рекомендации по режимам сварки приведены в табл. 18—20.

18. Рекомендуемые ток, напряжение дуги и вылет электрода при сварке в углекислом газе

Диаметр электродной проволоки	Вылет электрода	Ток, А	Напряжение, В
мм			
0,5	6—10	30—100	18—20
0,8	8—12	60—150	18—22
1,0	8—14	80—180	18—24
1,2	10—15	90—220	18—28
1,6	14—20	120—350	18—32
2,0	15—25	200—500	22—34
2,5	15—35	250—600	24—38

19. Режимы полуавтоматической и автоматической сварки стыковых швов без разделки кромок в углекислом газе

Толщина металла, мм	Зазор, мм	Число слоев	Диаметр электродной проволоки, мм	Ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Расход газа на один слой, л/мин
0,6—1,0	0,5—0,8	Один	0,5—0,8	50—60	18—20	20—25	6—7
1,2—2,0	0,8—1,0	Один-два	0,8—1,0	70—100		18—24	10—12
3—5	1,6—2,0	То же	1,6—2,0	180—200	28—30	20—22	14—16
6—8*	1,8—2,2	Два-три	2,0	250—300		18—22	16—18
8—12*						16—20	18—20

* Сварка с разделкой кромок.

20. Режимы автоматической и полуавтоматической сварки угловых швов в углекислом газе

Толщина металла, мм	Диаметр электродной проволоки, мм	Катет шва, мм	Число слоев	Ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки одного слоя, м/ч	Вылет, мм	Расход газа на один слой, л/мин
1—1,3	0,5	1,0—1,2	Один	50—60	18—20	18—20	8—10	5—6
	0,6	1,2—2,0		60—70				
1,5—2	0,8			60—75		16—18		6—8
		1,5—3,0		70—110				
1,5—3	1,2	2,0—3,0		90—130	20—22	14—16	10—12	8—10
3—4		3,0—4,0		120—150	20—22	16—18		
	1,6			150—180	28—30	20—22	16—18	12—14
5—6		5,0—6,0		230—260		26—28		16—18
				260—300		29—31		
		7,0—9,0		300—350		20—22		
Не менее катета шва	2,0	9,0—11,0	Два	300—350	30—32	24—26	20—24	18—20
		11,0—13,0	Три	300—350				
		13,0—15,0	Четыре	300—350				

Сварка на повышенных токах приводит к получению металла швов с пониженными пластичностью и ударной вязкостью, что, вероятно, объясняется повышенными скоростями охлаждения. Свойства металла швов при обычных режимах соответствуют свойствам металла швов, выполненных электродами типа Э50А (табл. 21). В промышленности находит применение и сварка в углекислом газе порошковыми проволоками. Технология этого способа сварки и свойства сварных соединений примерно такие же, как и при использовании их при сварке без дополнительной защиты.

21. Механические свойства металла швов при сварке низкоуглеродистых и низколегированных сталей в углекислом газе

Сталь	Сварочная проволока	$\sigma_т$, кгс/мм²	$\sigma_в$, кгс/мм²	δ, %	$a_н$, кгс·м/см²
БСт3кп	Св-08ГС	38—40	52—56	23—30	12—15
БСт3кп	Св-08Г2С	42—44	55—58	24—29	11—13
БСт3сп	Св-08Г2С	43—45	56—58	20—25	12—14

Примечание. Диаметр сварочной проволоки 2 мм; сила тока 300—340 А; напряжение дуги 28—30 В; скорость сварки 20 м/ч; сварка в три слоя.

СВАРКА ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ И ПРОВОЛОКОЙ СПЛОШНОГО СЕЧЕНИЯ БЕЗ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

Одним из преимуществ сварки открытой дугой порошковой проволокой по сравнению со сваркой в углекислом газе является отсутствие необходимости в газовой аппаратуре и возможность сварки на сквозняках, при которых наблюдается сдувание защитной струи углекислого газа. При правильно выбранном режиме сварки обеспечивается устойчивое горение дуги и хорошее формирование шва. В качестве источников тока можно использовать выпрямители и преобразователи с крутопадающими внешними вольт-амперными характеристиками. Недостатком этого способа сварки является возможность сварки только в нижнем и вертикальном положениях из-за повышенного диаметра выпускаемых промышленностью проволок и повышенной чувствительности процесса сварки к образованию в швах пор при изменениях вылета электрода и напряжения дуги. Особенностью порошковых проволок является также и малая глубина проплавления основного металла. Ориентировочные режимы сварки порошковыми проволоками приведены в табл. 22.

22. Оптимальные диапазоны сварочных токов и напряжений дуги при сварке порошковыми проволоками (в нижнем положении)

Марка проволоки	Диаметр проволоки, мм	Стыковой шов: Сварочный ток, А	Стыковой шов: Напряжение дуги, В	Стыковой шов: Скорость подачи, м/ч	Угловой шов «в лодочку»: Сварочный ток, А	Угловой шов «в лодочку»: Напряжение дуги, В	Угловой шов «в лодочку»: Скорость подачи, м/ч
ПП-1ДСК	1,8	200—350	25—30	—	200—300	26—31	—
ПП-2ДСК	2,3	400—450	25—31	382	340—380	29—32	382
ПП-АН3	3,2	450—525	26—32	265	450—560	27—31	265
ПП-АН4	2,3	500—600	28—29	382	440—475	30—34	382
ЭПС-15/2	2,2	320—360	28—32	337	320—330	29—32	337

При использовании проволоки ПП-1ДСК для соединений с повышенным зазором между кромками в швах могут образовываться поры. Проволока ЭПС-15/2 для получения швов без пор требует соблюдения режимов в узком диапазоне. Большие рабочие токи ограничивают применение этой проволоки для сварки металла малых толщин. Проволоки ПП-АН7 и ПП-2ДСК имеют хорошие сварочно-технологические свойства в широком диапазоне режимов.

Механические свойства металла швов при сварке порошковыми проволоками примерно такие же, как свойства соединений, выполненных электродами типа Э50А по ГОСТ 9467—75 (табл. 23). Для сварки ответственных конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей рекомендуется использовать проволоки ПП-2ДСК и ПП-АН4, обеспечивающие получение шва с хорошими показателями хладноломкости

23. Механические свойства швов при сварке низкоуглеродистых сталей порошковыми проволоками

Марка проволоки	$\sigma_т$	$\sigma_в$	δ_5, %	$a_н$, кгс·м/см², при температуре, °С			
	кгс/мм²			+20	−20	−40	−60
ПП-1ДСК	—	53,6	26,0	7,8	4,3	0,8	0,6
ПП-2ДСК	36,0	48,1	30,1	16,0	13,9	12,3	8,4
ПП-АН3	39,5	51,4	30,2	—	12,6	9,2	2,7
ПП-АН4	41,6	53,0	26,7	—	11,1	12,9	
ПП-АН7	—	52,0	28,4	19,9	14,3	2,6	1,2
ЭПС-15/2	41,6	50,1	26,6	16,3	14,0	6,3	0,7

В промышленности иногда используют сварку электродными проволоками без специальной защиты. Для сварки низкоуглеродистых сталей этим способом используют проволоки Св-15ГСТЮЦА и Св-20ГСТЮА. Технологические свойства дуги при сварке этим способом несколько хуже, чем при сварке в углекислом газе. Поверхность швов покрыта толстой пленкой окислов, плотно сцепленных с поверхностью.

Механические свойства металла швов соответствуют механическим свойствам шва, выполненного электродом типа Э50.

ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ СВАРКА

Электрошлаковую сварку широко применяют при изготовлении ответственных конструкций большой толщины из низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Равнопрочность сварного соединения достигается легированием металла шва через электродную проволоку и при переходе элементов из расплавляемого металла кромок основного металла. Последующая термическая обработка, кроме снижения остаточных напряжений, благоприятно влияет на структуру и свойства сварных соединений. При электрошлаковой сварке рассматриваемых сталей используют флюсы АН-8, АН-8М, ФЦ-1, ФЦ-7 и АН-22. Выбор электродной проволоки зависит от состава стали. При сварке низкоуглеродистых спокойных сталей с содержанием углерода до 0,15% хорошие результаты достигаются при использовании проволок Св-08А и Св-08ГА. Для предупреждения образования газовых полостей и пузырей при сварке кипящих сталей, содержащих мало кремния, рекомендуется электродная проволока Св-08ГС, содержащая 0,6—0,85% Si. При сварке сталей ВСт3 и некоторых марок низколегированных сталей удовлетворительные результаты достигаются при использовании электродных проволок Св-08ГА, Св-10Г2 и Св-08ГС, а при сварке стали 10ХСНД — проволоки Св-08ХГ2СМА. При электрошлаковой сварке низкоуглеродистых сталей равнопрочность металла шва и сварного соединения обеспечивается в состоянии после сварки, отпуска и после нормализации и отпуска. Однако ударная вязкость металла шва и металла на участке перегрева околошовной зоны в состоянии после сварки при 20° С меньше ударной вязкости основного металла. Ориентировочные режимы сварки приведены в табл. 24. Химический состав металла шва и механические свойства сварных соединений даны в табл. 6 и 8.

КОНТАКТНАЯ СВАРКА

При контактной сварке металл в зоне сварки подвергается термомеханическому воздействию. При точечной и шовной сварке химический состав металла литой зоны соединения не изменяется, так как изолирован от воздуха. При стыковой сварке состав металла в зоне сварки изменяется в результате взаимодействия с кислородом и азотом воздуха, испарения, удаления при осадке легкоплавких

24. Ориентировочные режимы электрошлаковой сварки низкоуглеродистых сталей

Толщина металла, мм	Сварочный ток на один электрод, А	Напряжение сварки, В	Количество электродов, шт.	Диаметр (сечение) электродов	Расстояние между электродами	Скорость подачи электродов	Скорость сварки
				мм		м/ч	
Проволочный электрод							
30	350—370	32—34	1	2,5	—	172	0,9—1,0
70	650	47			—	371—400	1,0—1,1
90	600—620	42—46	2	3,0	45—50	300	1,6
150	450—500	44—50			65	220—240	0,8—0,9
200	550	46—48			90	250	0,5
250	500—550	50—55			125	230—250	0,4—0,5
340	400—450	46—48	3		110	200—220	0,3
Пластинчатый электрод							
100	1000—1200	28—30	1	10×90	—	1,6	0,5
200			2				
300	1500—1800	30—32		10×135			0,45

расплавов и т. д. Во всех случаях сварки металл шва имеет литую структуру и отличается от структуры основного металла. При стыковой сварке в зоне стыка могут образовываться такие дефекты, как усадочные рыхлоты, раковины, трещины и др. Металл стыка характерен увеличенным размером зерен. В зависимости от состава стали закристаллизовавшийся металл соединения может иметь различную структуру. В большинстве случаев это ферритно-перлитная структура, но при повышенных скоростях охлаждения могут образовываться видманштеттова и даже мартенситная структура, особенно при повышении содержанном в стали углерода. При стыковой сварке в зоне стыка ввиду окисления углерода может наблюдаться обезуглероженная зона. При сварке стали с содержанием 0,25% С непосредственно в стыке его количество может понижаться до 0,1%. Это снижает механические свойства сварного соединения, чему способствует и искривление волокон в месте сварки. Структура и свойства основного металла в околошовной зоне также изменяются в результате термомеханического воздействия сварки. Они зависят от состава металла и предшествующей механической и термической обработки. Для низкоуглеродистых сталей эти изменения незначительны. Для термоупрочненных низколегированных сталей в околошовной зоне пластические свойства повышаются, прочностные свойства снижаются, для нетермоупрочненных сталей возможно появление закалочных структур со снижением пластических свойств металла.

При контактной сварке низкоуглеродистых сталей прочность и пластичность металла шва и околошовной зоны практически не уменьшаются. Для низколегированной стали прочность металла в околошовной зоне и пластические свойства соединения снижаются, что может приводить к образованию трещин. Сварной стык, выполненный на низкоуглеродистой стали стыковой сваркой оплавлением без последующей термической обработки, имеет высокую прочность при статической, ударной и циклической нагрузках. Ударная вязкость образцов с надрезом в плоскости стыка 6—12 кгс·м/см². Относительно невысокая ударная вязкость и значительное рассеяние результатов объясняются крупным зерном в зоне сварного стыка. Ударная вязкость может быть повышена последующей термической обработкой (высоким отпуском или нормализацией).

Перед сваркой заготовки правят, поверхности их очищают от загрязнений и взаимно подгоняют. При сварке неочищенных заготовок снижается качество

сварного соединения и увеличивается износ электродов контактных машин. При точечной и шовной сварке возможно образование выплесков и подплавление поверхности. Способ очистки зависит от размеров заготовок, характера загрязнений и типа производства. Для точечной и шовной сварки холоднокатаную сталь можно только обезжиривать. Ржавчину, а также слой окалины на горячекатаной стали удаляют травлением в растворах кислот с последующей нейтрализацией щелочным раствором и промывкой водой или подвергают пескоструйной обработке, предварительной очистке наждачными кругами, металлическими щетками и др. Мелкие детали в условиях массового производства очищают в галтовочных барабанах. Торцы заготовок для стыковой сварки обрабатывают до получения поверхности, перпендикулярной к оси заготовок, а после термической резки зачищают от шлака. Под точечную и шовную сварку заготовки собирают в сборочно-сварочных приспособлениях или на выполненных точечной сваркой прихватках с шагом 50—80 мм.

Точечной и шовной сваркой сваривают металл толщиной 0,05—6 мм; основной тип соединения — нахлесточное. Режим точечной и шовной сварки выбирают в зависимости от свойств и толщины металла и особенностей имеющегося оборудования. Режимы, приведенные в табл. 25—28, являются ориентировочными и подлежат корректировке в конкретных условиях.

25. Размеры точечных и шовных соединений, мм

Толщина тонкой детали	Диаметр литого ядра	Ширина шва	Минимальная нахлестка при однородном шве	Минимальный шаг точек
0,3	2,5—3,5	2,0—3,0	6	7
0,8	3,5—4,5	3,0—4,0	10—12	11
1,0	4,0—5	3,5—4,5	12—14	12
1,5	6,5—7,5	5,5—6,5	16—18	14
2,0	7,0—8,5	6,5—8	18—20	18
3,0	9,0—10,5	8,0—9,5	24—26	35
4,0	11—13	10,0—11,5	28—30	45
5,0	13—15	12—13,5	34—36	55
6,0	15—17	14—15,5	38—43	65

Для сварки сталей толщиной до 4 мм используют универсальные серийные машины. При сварке низкоуглеродистых сталей толщиной до 2 мм переменный ток промышленной частоты протекает непрерывно в виде одного импульса, а давление, приложенное к электродам, остается постоянным на протяжении всего процесса. При большей толщине, кроме основного, дается дополнительный импульс или используется цикл с одним импульсом и переменным усилием давления (проковкой). При сварке низколегированных сталей, кроме указанных циклов, возможны и другие (с постоянным давлением при толщине до 2 мм с одним модулированным импульсом, а при большей толщине с двумя дополнительными импульсами). Различие режимов точечной и шовной сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей незначительно: для последних требуется несколько увеличенное давление. Для низколегированных сталей некоторых марок может потребоваться подогрев перед сваркой и после нее. Это достигается подбором соответствующего цикла изменения и включения тока. Шовную сварку низкоуглеродистых и низколегированных сталей осуществляют при постоянной скорости сварки, постоянном давлении и прерывистом включении тока.

Стыковая сварка сопротивлением (табл. 29) из-за неравномерности нагрева и окисления металла на торцах заготовок обеспечивает пониженное качество соединения, и поэтому ее применяют ограниченно (для деталей с площадью сечения до 250 мм²). Лучшие результаты достигаются при сварке оплавлением. Предупреждение возможности образования в соединении закалочных структур достигается при сварке оплавлением с подогревом. Этот же способ применяют при сварке деталей с большой площадью сечения (до 1000 мм² непрерывным оплавлением и дета-

26. Режимы точечной сварки низкоуглеродистой стали

Параметр	Толщина заготовок, мм																							
	0,5 + 0,5		1 + 1		1,5 + 1,5		2 + 2		2,5 + 2,5		3 + 3		4 + 4		5 + 5		6 + 6	
Диаметр контактной поверхности, мм:																		
начальный	5		5		6		7		8		10		12		12		14	
перед запиливанием	6		6		7		8		10		12		14		14		15	
Продолжительность прохождения сварочного тока, с	0,2—0,3		0,2—0,35		0,25—0,35		0,25—0,35		0,4—0,6		0,6—1		0,8—1,1		0,9—1,2		1,1—1,5	
Усилие на электродах, кгс	30—40		80—120		120—160		160—200		200—250		500—600		600—800		800—900		900—1200	
Сила тока, А	4000—5000		6000—7000		7000—8000		8000—9000		11 000—12 000		12 000—16 000		14 000—18 000		17 000—22 000		20 000—25 000	

27. Режимы непрерывной шовной сварки низкоуглеродистой стали

Параметр	Толщина заготовок, мм																							
	0,2 + 0,2		0,5 + 0,5		1 + 1		0,2 + 0,2		0,5 + 0,5		1 + 1		1,5		2									
Ширина роликов, мм	4		5		5		4		5		5													
Усилие сжатия, кгс	80		100		120		80		100		120													
Скорость сварки, м/мин	1																							
Сила тока, А	2500		3000		3500		3500		4500		5000		5000		6000		7000		8000		9000		10 000	

лей большего сечения — с подогревом). Способ и режим стыковой сварки (табл. 30—31) выбирают в зависимости от материала, величины и формы поперечного сечения свариваемых заготовок с учетом требований к сварному изделию и имеющегося оборудования. Для равномерного нагрева и одинаковой пластической деформации обеих заготовок форму и размеры сечения их возле стыка следует выполнять примерно одинаковыми; диаметры не должны различаться более чем на 15%, а толщина — более чем на 10%.

28. Режимы прерывистой шовной сварки низкоуглеродистой стали

Параметр	Толщина заготовок, мм						
	0,25 + + 0,25	0,5 + + 0,5	0,75 + + 0,75	1 + 1	1,25 + + 1,25	1,5 + + 1,5	2 + 2
Ширина контактной поверхности роликов, мм	5		6		8,5		10
Усилие сжатия, кгс	175	225	300	400	450	525	650
Продолжительность включения тока, с	0,04		0,06		0,08		0,1
Приблизительное число прерываний:							
в секунду	16	12,5	10	8	7	6	5
на 1 м шва	500	400	333	386	252	250	200
Сила тока, А	8000	11 000	13 000	15 000	16 500	17 500	19 000
Примерный шаг точек, мм	2	2,5	3	3,5	3,9	4	5

29. Режимы сварки сопротивлением круглых или квадратных заготовок из углеродистой стали при давлении осадки 1—3 кгс/мм²

Параметр	Площадь сечения заготовки, мм²			
	7	25	50	100
Установочная длина на обе заготовки, мм	7	12	16	20
Припуск на осадку, мм:				
общий	2,2	2,5	2,7	3,0
под током	1,6	1,7	1,8	2,0
без тока	0,6	0,8	0,9	1,0
Плотность тока, А/мм²	—	200	160	140
Время нагрева, с	0,2—0,3	0,6—0,8	0,8—1,0	1,0—1,5

Примечание. Припуск на осадку указан для сварки заготовок с плотно подогнанными торцами.

30. Наименьшие напряжения (В) холостого хода при стыковой сварке

Площадь сечения, мм²	Сварка		
	сопротивлением	непрерывным оплавлением	оплавлением с предварительным подогревом
До 50	1,5	4	3,5
Св. 50 до 100	2	4,5	4
» 100 » 250	2,5	5	4,5
» 250 » 500	3	6,5	5
» 500 » 1000	—	8	5,5
» 1000 » 2000	—	10	6
» 2000 » 5000	—	—	6,5
» 5000 » 10 000	—	—	7

31. Припуски (мм) при стыковой сварке оплавлением стержней из низкоуглеродистых и низколегированных конструкционных сталей (на оба стержня)

Диаметр стержня, мм	Площадь сечения, мм²	Припуск при сварке с подогревом			Припуск при сварке непрерывным оплавлением		
		общий	на оплавление	на осадку	общий	на оплавление	на осадку
5	20	—	—	—	6	4	2,0
10	78	7,3	5	2,3	8	5,7	2,3
14	154	9,3	6,5	2,8	12	9,5	2,5
18	254	11,2	8,0	3,2	16	13	3,0
22	380	12,6	9,0	3,6	18	14,8	3,2
26	530	15	11,2	3,8	22	18,5	3,5
30	707	16	12,0	4,0	25	21,5	3,5
36	1018	18	13,0	5,0	30	26	4,0
40	1257	20	14,5	5,5	33	28,5	4,5
45	1590	21	15,0	6,0	37	31,5	5,5
55	2376	23	16,0	7,0	—	—	—
60	2827	25	17,5	7,5	—	—	—
70	3848	26	18,0	8,0	—	—	—
80	5027	28	19,5	8,5	—	—	—
90	6362	32	23,0	9,0	—	—	—
100	7850	38	28,0	10,0	—	—	—

Примечания: 1. Суммарная установочная длина равна 1,5 диаметра стержня при сварке низкоуглеродистых сталей и 2—2,4 диаметра стержня при сварке низколегированных сталей.

2. При наличии зазоров между неровно срезанными торцами надо соответственно увеличить общий припуск на сварку (за счет припуска на оплавление).

3. Припуск на осадку под током составляет 40—50% общего припуска на осадку.

Список литературы

1. **Каховский Н. М., Фартушный В. Г., Ющенко К. А.** Электродуговая сварка сталей. Киев, «Наукова думка», 1975. 479 с.

2. **Справочник** по сварке. Под ред. А. И. Акулова. Т. 4. М., «Машиностроение», 1971. 416 с.

3. **Справочник** сварщика. Под ред. В. В. Степанова. М., «Машиностроение», 1974. 520 с.

4. **Технология** электрической сварки металлов и сплавов плавлением. Под ред. Б. Е. Патона. М., «Машиностроение», 1974. 767 с.

5. **Технология** и оборудование контактной сварки. Под ред. Б. Д. Орлова. М., «Машиностроение», 1975. 536 с.

Глава 6

СВАРКА КОНСТРУКЦИОННЫХ СРЕДНЕ- И ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТЫХ И ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА

Конструкционную сталь, применяемую в сварных изделиях, выплавляют в основных и кислых мартеновских и открытых электропечах. Нередко осуществляют рафинирование стали (особенно легированных высокопрочных сталей) жидким синтетическим шлаком (СШ) в ковше, а также электрошлаковым переплавом (ЭШП). В некоторых случаях производят вакуумно-дуговой переплав (ВДП) и выплавку в индукционных печах (ВИ). Рафинирование снижает загрязненность стали неметаллическими включениями (оксидами, сульфидами, силикатными и т. д.), вредными примесями (серой) и газами, уменьшает число дефектов (волосовины и пористость), что улучшает свариваемость сталей. Однако при этом повышается склонность сталей к росту зерна при нагреве. Поэтому иногда ударная вязкость сварных соединений в зоне термического влияния оказывается ниже, чем у сталей обычной выплавки.

К *среднеуглеродистым* относят стали, содержащие 0,26—0,45% С. Среднеуглеродистые стали отличаются от низкоуглеродистых различным содержанием углерода. Качественные углеродистые стали могут быть с повышенным содержанием марганца (0,7—1,0%). Среднеуглеродистые стали используют в нормализованном состоянии. Для сварно-литых и сварно-кованых конструкций применяют преимущественно стали 35 и 40.

К *высокоуглеродистым* относятся стали, содержащие 0,46—0,75% С. Они отличаются плохой свариваемостью и их не применяют для изготовления сварных конструкций. Необходимость сварки подобных сталей возникает при ремонтных работах. Химический состав некоторых средне- и высокоуглеродистых качественных конструкционных сталей по ГОСТ 1050—74 и ГОСТ 4543—71 представлен в табл. 1.

1. Химический состав некоторых средне- и высокоуглеродистых сталей

Сталь	Содержание, %	
	С	остальных элементов
30	0,27—0,35	
35	0,32—0,40	0,5—0,8 Mn,
40	0,37—0,45	0,17—0,37 Si,
45	0,42—0,50	⩽ 0,25 Cr,
50	0,47—0,55	⩽ 0,25 Ni
60	0,57—0,65	
25Г	0,22—0,30	0,7—1,0 Mn,
35Г	0,32—0,40	0,17—0,37 Si,
45Г	0,42—0,50	⩽0,25 Cr, ⩽0,25 Ni

2. Механические свойства некоторых средне- и высокоуглеродистых сталей

Сталь	$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ_5	ψ	$a_н$, кгс · м/см²
	кгс/мм²		%		
	не менее				
30	50	30	21	50	8
35	54	32	20	45	7
40	58	34	19	45	6
45	61	36	16	40	5
50	64	38	14	40	4
60	69	41	12	35	—
25Г	50	30	22	50	9
35Г	57	34	18	45	7
45Г	63	38	15	40	5

Основным легирующим элементом, определяющим механические свойства углеродистых сталей, является углерод. С повышением углерода увеличивается прочность ($\sigma_в$ и $\sigma_т$) и снижается пластичность (δ, ψ, $a_н$). Чувствительность к перегреву и закаливаемости повышается, что снижает свариваемость. Марганец, кремний, сера, фосфор, кислород, водород и азот попадают в металл в процессе производства. Из них активными раскислителями являются марганец и кремний. Сера образует низкотемпературную эвтектику Fe—FeS по границам зерен, что приводит к красноломкости при ковке и прокатке и к горячим трещинам при сварке. Фосфор, растворяясь в феррите, резко снижает пластичность стали и повышает хладноломкость. Содержание серы и фосфора в сталях для сварных изделий не должно превышать 0,035—0,040%.

Кислород, образуя оксидные включения, охрупчивает сталь. Азот, образуя нитриды, также способствует охрупчиванию стали. Азот и кислород при сварке способствуют образованию пористости. Содержание их не должно превышать предела растворимости в данной стали. Водород при высоком содержании вызывает образование внутренних надрывов — флокенов. При охлаждении стали ниже 200° С водород выделяется из твердого раствора и создает внутренние напряжения, приводящие к появлению трещин. Содержание газов в металлах снижается при выплавке и разливке в вакууме.

Механические свойства некоторых углеродистых качественных конструкционных сталей приведены в табл. 2.

К *конструкционным* легированным будем относить стали, легированные одним или несколькими элементами при суммарном их содержании 2,5—10%, предназначенные для работы при температурах до 500° С.

Для современных легированных сталей характерно многокомпонентное комплексное легирование. Оно более экономично и позволяет получить стали с более высокими механическими свойствами. Механические свойства после упрочняющей термической обработки (закалки + отпуска) некоторых конструкционных легированных сталей, применяющихся для сварных конструкций, приведены в табл. 3.

3. Механические свойства некоторых конструкционных легированных сталей

Сталь	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ, %	$a_н$, кгс · м/см²	Термическая обработка
	кгс/мм²				
	не менее				
12Х2НВФА	100	90	12	8	Закалка + отпуск при 500 °С
25ХГСА	110	100	10	6	
30ХГСА	120	112	9	5	
23Х2НВФА	130	115	10	6,5	
30Х2ГСНВМ	165	135	7	6	Закалка + отпуск при t, °С: 210
30ХГСНА		140	9		200
28Х3СНМВФА			8,5	5,0	300—400 °С
43Х3СНМВФА	190	160	7	3,5	
42Х2ГСНМ		165		4	280 °С

Широкое применение легированных сталей в конструкциях связано с их высокой прочностью при сохранении достаточной пластичности и вязкости. Среднелегированные стали, применяемые для сварных конструкций, в основном относятся к перлитному классу. Однако некоторые стали этой группы, содержащие 5—6% легирующих элементов и более, относятся к мартенситному классу (30Х2ГСНВМ, 42Х2ГСНМ, 28Х3СНМВФА и др.). Высокие механические свойства конструкционных легированных сталей достигаются легированием элементами, упрочняющими феррит и повышающими прокаливаемость стали, и надлежащей термической обработкой, после которой проявляется положительное влияние легирующих элементов. Поэтому стали данной группы характеризуются как хими-

ческим составом, так и видом термической обработки. Стали, предназначенные для изготовления сварных конструкций, подвергают улучшению (закалке с последующим отпуском). При высоких прочностных свойствах легированные стали после соответствующей термической обработки по пластичности и вязкости не уступают, а в некоторых случаях даже превосходят такой пластичный материал, как низкоуглеродистая сталь.

Высокие прочностные и пластические свойства легированных сталей сочетаются с высокой стойкостью против перехода в хрупкое состояние, что и определяет их использование для конструкций, работающих в тяжелых условиях, например при ударных и знакопеременных нагрузках, при низких или высоких температурах и давлениях, в агрессивных средах и пр. Конструкционные легированные стали широко используют для создания облегченных сварных высокопрочных конструкций. Однако не все конструкционные легированные стали хорошо или удовлетворительно свариваются. Чем в большей степени легирована сталь элементами (включая углерод), способствующими образованию хрупкой структуры мартенсита при термическом цикле сварки, тем хуже свариваемость данной стали при прочих равных условиях (метод выплавки, тип соединения, толщина свариваемой детали и т. п.). Например, стали 38Х2МЮА, 30ХН2МФА, 18Х2Н4МА, 38ХН3МФА и им подобные для сварных конструкций применять не рекомендуется.

Для конструкционных средне- и высокоуглеродистых и легированных сталей характерной особенностью является образование закалочных структур в шве и зоне термического влияния, создающих опасность хрупкого разрушения. Поэтому для получения надежных сварных соединений при изготовлении изделий из сталей этой группы необходимо выбирать марку стали не только исходя из показателей прочности основного металла, но и с учетом возможности получения необходимых стабильных механических свойств сварных соединений в условиях производства данного конкретного изделия и полной реализации этих свойств при работе конструкции.

В некоторых случаях разрушения происходят вследствие концентрации напряжений, появления значительных по величине остаточных сварочных напряжений и снижения пластичности металла. Эти факторы проявляются сильнее в результате конструктивных недостатков, неправильного выбора материалов для сварных изделий, способов сварки и технологии.

Надежность и долговечность сварных соединений должны являться основными и главными критериями при выборе марки стали и способов изготовления сварных изделий. В ряде случаев оказывается более целесообразным выбор менее прочной стали, с меньшим содержанием углерода, но более технологичной при сварке. Содержание углерода более 0,30% способствует склонности сталей к перегреву и закалке, образованию горячих и холодных трещин в сварном соединении и пор в металле шва. Для предупреждения этих явлений необходимы усложняющие технологический процесс операции подогрева при сварке и термообработки после сварки.

При изготовлении ответственных сварных изделий из закаливающихся сталей в технологическом процессе должны быть предусмотрены меры, предупреждающие опасность хрупких разрушений: 1) применение основного металла с регламентированным составом и свойствами, в частности спокойной и дополнительно раскисленной стали, низколегированных сталей вакуумно-дугового и электрошлакового переплава и др.; 2) применение методов сварки, обеспечивающих высокие механические свойства металла шва (дуговая сварка покрытыми электродами, под флюсом, в защитных газах и др.); 3) применение методов контроля, ограничивающих наличие в сварных швах различных дефектов; 4) правильное конструктивное оформление элементов сварных конструкций (исключение резких переходов от одного сечения к другому, исключение скопления швов, вызывающих объемные сварочные напряжения и повышающих жесткость изделия, предпочтительное применение стыковых швов и др.); 5) повышение требований к качеству сборки (минимальные зазоры и смещения, недопустимость натягов при сборке и др.);

6) применение термической обработки, обеспечивающей заданные механические свойства сварных соединений и снимающей остаточные напряжения от сварки; 7) индустриализация методов производства сварных конструкций, позволяющая обеспечить более высокое и стабильное качество сварочных работ в целом.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СВАРИВАЕМОСТИ

Свариваемость конструкционных углеродистых и легированных сталей можно определить как способность стали переносить тепловой режим при том или ином сварочном процессе без образования в соединении участков металла с пониженными пластическими свойствами, способствующими возникновению трещин при сварке конструкций или разрушению сварных соединений в эксплуатации. Рассматриваемая группа материалов относится к закаливающимся сталям, в сварных соединениях которых под действием термического цикла сварки могут образовываться хрупкие и малопластичные зоны в участках, где металл нагревается до температур выше точки Ac_3. Распад аустенита при охлаждении в условиях сварочного термического цикла начинается при более низких температурах и в некоторых случаях полностью не заканчивается даже при остывании до 20° С; при этом в структуре металла наряду с мартенситом остается нестабильный остаточный аустенит (в зависимости от уровня легирования).

Стали, склонные к резкой закалке, имеющие в результате термического цикла сварки структуру мартенсита и остаточного аустенита при повышенной концентрации водорода, при воздействии внутренних напряжений чувствительны к образованию холодных трещин. Наиболее часто холодные трещины образуются в швах и околошовной зоне среднеуглеродистых и легированных сталей перлитного и мартенситного классов, свариваемых проволокой, состав которой близок к составу основного металла. Холодные (закалочные) трещины возникают как в интервале температур образования мартенсита (250° С и ниже), так и после полного остывания сварного изделия, спустя некоторое, иногда значительное время после сварки (через 24—48 ч). Чем ниже температура распада аустенита, грубее структура мартенсита, выше уровень внутренних сварочных и структурных напряжений, тем вероятнее образование холодных закалочных трещин. С увеличением толщины свариваемого металла возможность образования закалочных трещин возрастает.

Элементы, снижающие температуру $\gamma \rightarrow M$ превращения, усиливают склонность металла к образованию холодных закалочных трещин. К таким элементам прежде всего относится углерод. В среднелегированных сталях температура мартенситного превращения снижается при повышении содержания марганца, никеля, хрома, молибдена и др. О свариваемости применительно к ее чувствительности к закаливаемости ориентировочно судят по коэффициенту эквивалентности по углероду для различных легирующих элементов:

$$C_э = C\% + \frac{Mn}{6}\% + \frac{Cr}{5}\% + \frac{V}{5}\% + \frac{Mo}{4}\% + \frac{Ni}{15}\% + \frac{Cu}{13}\% + \frac{P}{2}\%.$$

Стали с эквивалентом по углероду более 0,45 склонны к образованию трещин при сварке. Однако этот критерий не является основанием для неприменения стали в сварной конструкции. При одном и том же показателе $C_э$ стали с большим содержанием углерода имеют более высокую чувствительность к холодным трещинам, чем сложнолегированные стали с меньшим содержанием углерода. Образование холодных трещин спустя некоторое время после полного остывания сварного соединения является наиболее неприятным, так как качество изделия теряется после его контроля. Замедленное разрушение связано с фиксированием нестабильного остаточного аустенита в структуре мартенсита при быстром остывании участков сварных соединений, нагревающихся при сварке выше точки Ac_3. Остаточный аустенит с течением времени распадается при 20° С. Интенсивность этого процесса усиливается при охлаждении ниже 0° С.

При сварочном цикле создаются благоприятные условия для образования остаточного аустенита вследствие повышенной гомогенизации твердого γ-раствора при нагреве до высоких температур и высокой скорости охлаждения. Так, в стали 30ХГСА [4] после термического цикла, имитирующего сварочный, содержится до 17% остаточного аустенита, тогда как после обычной закалки с 900° С это содержание равно 8%. Кроме того, объемные напряжения сжатия, возникающие в шве и прилегающей зоне основного металла при образовании мартенсита, затормаживают процесс мартенситного превращения и могут способствовать сохранению еще большего количества остаточного аустенита, чем это наблюдается на свободных образцах, равномерно нагреваемых по всему объему. При распаде остаточного аустенита с увеличением объема образуется хрупкая структура неотпущенного мартенсита, что вызывает дополнительные структурные напряжения, кроме сварочных, в области хрупких структур шва и околошовной зоны. Вследствие увеличения микрообъемов металла при распаде остаточного аустенита происходит зарождение и развитие трещин в ранее образовавшемся мартенсите. Чем грубее структура первичного мартенсита, тем она более хрупка, и образование трещин более вероятно.

Когда сварной шов накладывается в условиях жесткого закрепления свариваемых деталей, в шве после остывания развиваются высокие растягивающие напряжения от реакции заделки. Суммарное воздействие растягивающих сварочных напряжений I рода и структурных напряжений, возникающих в результате распада остаточного аустенита при 20° С, в критических случаях приводит к появлению трещин с течением времени. Этот эффект усугубляется наличием различных концентраторов напряжений: подрезами, непроварами, включениями, резкими переходами в проплаве и т. д. Образованию трещин с течением времени способствует водород, растворенный в металле; он затормаживает распад аустенита и снижает точку мартенситного превращения стали. Избыточный водород, растворенный в металле, с распадом аустенита, постепенно выделяясь в несплошности структуры в виде молекулярного водорода, создает местные внутренние давления [6], облегчающие возможность образования микротрещин.

Образование хрупкой структуры мартенсита является необходимым, но не всегда достаточным фактором для реального появления трещины. Необходимо наличие и других факторов — растягивающих напряжений, остаточного аустенита и избыточного водорода. Многие конструкции свариваются и надежно эксплуатируются (особенно из низкоуглеродистых легированных сталей) при наличии структуры мартенсита в сварном соединении, если устранены концентраторы напряжений в хрупкой зоне или созданы благоприятные условия в сварном соединении, снижающие чувствительность конструкций к концентрациям напряжений (применены аустенитные присадки, обеспечивающие аустенитную структуру шва с высокой пластичностью, или поверхностная обработка путем наклепа).

Образование холодных трещин при сварке закаливающихся сталей уменьшается: 1) при выборе способа и технологии сварки, обеспечивающих отсутствие грубодендритной закалочной структуры литого металла шва, минимальном перегреве зоны термического влияния и минимальных дополнительных растягивающих напряжениях при остывании шва за счет реакций связей; 2) при сварке с применением подогрева, уменьшающего вероятность образования закалочных структур; 3) при снижении содержания водорода в сварном соединении; 4) при отпуске после сварки.

Применение специальных присадочных проволок и флюсов, многослойной сварки, колебательных движений электрода при автоматической сварке, импульсного режима сварочного тока (при малых толщинах металла), подбор оптимальных режимов сварки позволяют обеспечить более равноосную зернистую структуру металла шва и предупредить чрезмерное развитие зоны перегрева основного металла с крупнокристаллической структурой.

Метод сварки влияет на склонность сварных соединений к образованию холодных замедленных трещин. Для среднелегированных сталей методы сварки по возрастанию сопротивляемости сварных швов к образованию холодных трещин

можно расположить в следующем порядке: автоматическая сварка под кислыми флюсами (АН-348-А и др.), ручная дуговая сварка электродами типа УОНИ-13 (УОНИ-13/45; УОНИ-13/85), сварка в CO_2, аргонодуговая сварка.

Обеспечение при сварке изделий свободной усадки сварных соединений с помощью рациональной конструкции, порядка наложения сварных швов, применения приспособлений, создающих сжимающие напряжения в сварном соединении при остывании, позволяют снизить реактивные растягивающие напряжения в сварных соединениях. Например, при вварке фланцев (рис. 1, *а*) хороший эффект обеспечивает предварительный выгиб кромок листа для компенсации усадки (рис. 1, *б*), замена вварки плоским кольцевым швом сваркой по отбортовке (рис. 1, *в*). запрещение применения сварки угловыми швами (рис. 1, *г*). Предварительный или сопутствующий подогрев с целью предупреждения образования закалочных структур следует производить лишь в крайних случаях и для деталей с небольшим протяжением сварных швов, так как поддержание с достаточной точностью заданное

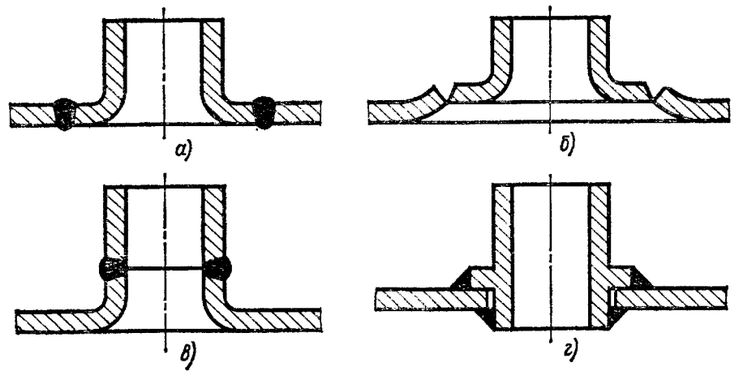


Рис. 1. Типы сварных соединений штуцеров

температуры подогрева по всей длине шва в течение всего процесса сварки является трудно осуществимым, а условия работы сварщика становятся весьма тяжелыми; все это делает технологический процесс нестабильным. Подогрев осуществляют газовыми горелками и с помощью ТВЧ посредством индукторов. Температуру в пределах 100—500° С контролируют цветными термокарандашами.

Снижение содержания водорода в металле шва для предупреждения холодных трещин обеспечивается применением осушенных защитных газов, низководородистых электродов (основного типа), прокаливанием их и флюсов перед сваркой. При газоэлектрических методах сварки (сварка в CO_2, в аргоне и др.) влажность газов необходимо контролировать. Следует применять сухие газы с точкой росы не выше — 50° С, так как влажные газы резко повышают склонность сварных швов к образованию холодных трещин [9, 15]. При ручной дуговой сварке сталей с пределом текучести 70 и 100 кгс/мм^2 содержание влаги в покрытии не должно превышать соответственно 0,2 и 0,1% [15].

Эквивалентное содержание углерода влияет на критическое содержание водорода в металле конструкционных легированных сталей (рис. 2). Чем выше содержание углерода и других элементов, понижающих температуру мартенситного превращения, тем при меньшем содержании водорода образуются трещины.

Отпуск сварных конструкций снимает остаточные сварочные напряжения, улучшает структуру и свойства металла шва, снижает твердость закаленных зон сварного соединения и устраняет опасность образования холодных трещин со временем. Перерыв между началом сварки и термической обработкой устанавливают различный (от 30 мин до нескольких часов) в зависимости от марки стали и склонности ее сварных соединений к замедленному разрушению. В тех случаях, когда

немедленное проведение высокого отпуска (местного с помощью ТВЧ или общего в печи) затруднено, применяют предварительно низкий стабилизирующий отпуск при 250—300° С с последующим высоким отпуском в печи. В некоторых случаях последующий высокий отпуск не применяют, если механические свойства соединений удовлетворяют требованиям эксплуатации; опасность холодных трещин после стабилизирующего отпуска исключена.

Склонность к горячим трещинам сварных швов углеродистых и легированных конструкционных сталей, рассматриваемых в данной главе, определяется следующими факторами: 1) химическим составом металла шва, от которого зависит межкристаллитная прочность и пластичность в опасном температурном интервале хрупкости (ТИХ); 2) величиной и скоростью нарастания растягивающих напряжений и соответственно деформаций в ТИХ; 3) величиной первичных кристаллитов; 4) формой сварочной ванны (шва), от которой зависит направление роста столбчатых кристаллитов, характер их срастания, степень зональной ликвации и расположение осей кристаллитов (или межкристаллитных участков) относительно направления растягивающих напряжений.

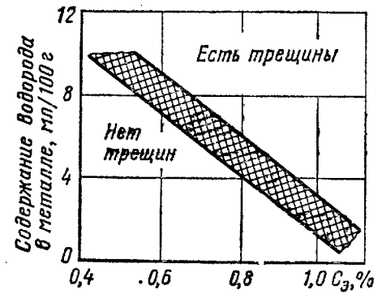


Рис. 2. Влияние $C_э$ и водорода в стали на образоваиие трещин

Элементами, обусловливающими образование горячих трещин в металле углеродистых и легированных швов, являются прежде всего сера, затем углерод, фосфор, кремний, медь, никель (при содержании 2,5—4,5%), а также примеси металлов с низкой температурой плавления (свинец, олово, цинк). Элементами, повышающими стойкость швов против трещин, нейтрализующими действие серы, являются марганец, кислород, титан, хром и особенно ванадий [1, 14]. Измельчение и дезориентирование структуры металла шва, предупреждение развития грубой дендритной структуры с ликвационными зонами за счет соответствующего легирования и приемов сварки — все это повышает сопротивляемость швов против разрушения в температурном интервале хрупкости.

Качественные конструкционные стали, содержащие минимальное количество серы и фосфора (менее 0,035—0,025%), малочувствительны к горячим трещинам. Однако с повышением содержания углерода выше 0,25% чувствительность к горячим трещинам заметно возрастает. При этом чем ниже содержание легирующих элементов, препятствующих образованию кристаллизационных трещин, тем выше склонность к трещинообразованию при одном и том же содержании углерода. В швах среднеуглеродистых сталей склонность к горячим трещинам резко падает при легировании марганцем до 1,8—2,5%. С этих позиций применение марганцовистых сталей (10Г2А, 12Г2А и др.) той же прочности более желательно.

При сварке листов встык наиболее опасными местами появления горячих трещин являются начало и конец шва. Наложение связи путем приварки технологических планок, заварка концевых участков шва в направлении от центра к краю свариваемых листов позволяют предупредить образование концевых трещин. Часто горячие трещины появляются в прихватках. Более частые прихватки, наложение их с обратной стороны шва уменьшают опасность образования трещин. Снижение растягивающих внутренних напряжений при охлаждении шва в ТИХ и тем самым предупреждение горячих трещин может быть достигнуто путем уменьшения числа и сосредоточения швов при конструировании, выбора оптимальной формы разделки кромок, устранения излишней жесткости узлов и другими мерами. Предварительный подогрев является эффективным, особенно для высокоуглеродистых сталей. Температура подогрева колеблется от 150 до 500° С в зависимости от химического состава металла шва (величины $C_э$), конструкции и сечения деталей и других факторов.

Для снижения внутренних растягивающих напряжений в ТИХ целесообразно выполнять сварку такими методами, которые обладают наибольшей проплавляющей способностью при наименьшей погонной энергии (электронный луч, плазменная дуга, импульсная дуга, сварка с активирующими флюсами и др.). Стойкость против образования горячих трещин повышается при устранении концентраторов, вызванных формой шва и подготовкой кромок под сварку. Применение швов с остающимися подкладками, сварка «в замок», швы с непроваром и т. п. являются нежелательными. Сварка встык с полным проплавом наиболее предпочтительна.

В швах углеродистых и легированных конструкционных сталей может наблюдаться пористость. Поры образуются вследствие чрезмерного насыщения жидкого металла водородом или азотом, поступающим из среды, окружающей дугу, или из расплавляемого металла, и последующего их выделения при кристаллизации металла. Образование пор возможно непосредственно перед началом кристаллизации металла в результате запоздавшей реакции раскисления углеродом из-за недостатка в шве других раскислителей (Si, Mn, Al). Водород может попасть в зону сварки с маслом, влагой и ржавчиной при использовании влажных электродов, флюсов и защитных газов. Ухудшение защиты сварочной зоны от воздуха и связанная с этим возможность образования пор возрастают при увеличении зазоров между кромками и размеров зерен флюса, при повышении напряжения на дуге и увеличении скорости сварки.

Появление пор при сварке иногда обусловлено насыщением азотом поверхности листов при их нагреве в специальных безокислительных газовых защитных смесях в процессе металлургического производства. Особенно это проявляется при сварке тонколистового металла без разделки кромок.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ

Среднеуглеродистые стали. В сталях с содержанием углерода 0,30% и выше при быстром охлаждении металла в зоне термического влияния образуется твердая мартенситная или трооститная структура, значительно более хрупкая, чем основной металл, что создает опасность хрупкого разрушения как в процессе изготовления изделий (холодные трещины), так и при эксплуатации. С повышением углерода повышается также опасность образования пористости в сварных швах.

Для предупреждения трещин при сварке следует применять предварительный подогрев, а после сварки — высокотемпературный отпуск для восстановления пластичности сварного соединения и снятия внутренних напряжений. Для предупреждения пористости следует использовать специальные электроды. Среднеуглеродистые стали применяют для изготовления малонагруженных изделий. Для повышения прочности изделия из этих сталей после сварки иногда подвергают упрочняющей термической обработке, обеспечивающей $\sigma_в = 70 \div 90$ кгс/мм². Среднеуглеродистые стали не являются оптимальными для сварных конструкций. Вместо них целесообразно использовать углеродистые стали, легированные марганцем, например стали 10Г2А и 12Г2А, обеспечивающие получение сварных соединений с прочностью 45—90 кгс/мм², стойких против образования горячих и холодных трещин, не требующих обязательной термической обработки после сварки.

Высокоуглеродистые стали. Склонность высокоуглеродистых сталей к хрупкости после воздействия термического цикла сварки выражена значительно сильнее, чем в среднеуглеродистых сталях, и чувствительность их к горячим и холодным трещинам значительно выше. Поэтому обязателен предварительный подогрев металла в месте сварки до 250—400° С, и последующий отжиг желателен до того, как сварное изделие успеет остыть до 20° С.

Легированные стали средней прочности ($\sigma_в = 90 \div 130$ кгс/мм²). При изготовлении сварных изделий из легированных сталей широкое применение получили стали перлитного класса типа ХГСА с меньшим или большим содержанием углерода (25ХГСА, 30ХГСА) и сложнолегированные стали с низким содержанием

углерода (12Х2НВФА, 23Х2НВФА и др.). Конструкционные стали средней прочности перлитного класса в зависимости от вида термической обработки имеют следующие структуры: при отжиге — ферритно-перлитную; при закалке — мартенситную или троосто-мартенситную; при отпуске закаленной стали — троосто-мартенситную, троститную, троосто-сорбитную и сорбитную.

Для изготовления сварных изделий из сталей 25ХГСА и 30ХГСА с пределом прочности 110—130 кгс/мм² после сварки применяют термическую обработку (закалку и отпуск). Изделия больших габаритных размеров целесообразно изготовлять из предварительно термически обработанных элементов. Для снятия внутренних напряжений после сварки применяют отпуск. Эти стали рекомендуется использовать для ответственных штампо-сварных конструкций. Стали 12Х2НВФА и 23Х2НВФА упрочняют путем термической обработки (закалки в масле с последующим отпуском или нормализации с отпуском). Для изготовления конструкций из термически обработанных элементов рекомендуются соответственно стали с $\sigma_в \geqslant 100$ кгс/мм² и $\sigma_в \geqslant 130$ кгс/мм², работающие при повышенных температурах (до 500° С); допускается термическая обработка этих сталей после сварки.

Конструкционные легированные высокопрочные стали ($\sigma_в = 150 \div 200$ кгс/мм²). Изготовление надежных сварных изделий из высокопрочных легированных сталей (30ХГСНА, 30Х2ГСНВМ, 42Х2ГСНМ, 28Х3СНМВФА и др.) затрудняется из-за опасности образования холодных трещин, а также повышенной чувствительности этих сталей к концентраторам напряжений при статических и особенно при динамических нагрузках. Сварные конструкции следует проектировать с наименьшей концентрацией напряжений. Все радиусы перехода от одного сечения детали к другому должны быть максимальными (предельно допустимыми из конструктивных соображений).

Для повышения прочности при повторных статических нагрузках необходимо создавать плавные переходы от шва к основному металлу. Даже для стыкового сварного соединения целесообразно удалять усиление сварного шва и особенно проплав сварного шва, имеющий более крутой переход от шва к основному металлу. Наличие остающихся подкладок в равнопрочных сварных соединениях не допускается. В тех случаях, когда механическая обработка внутренней поверхности деталей для зачистки проплава невозможна, следует производить комбинированную сварку без остающейся подкладки. При этом первый слой шва выполняют автоматической аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом без присадки с обеспечением 100% равномерного проплавления по всей длине шва. Последующие слои наносят одним из методов сварки плавящимся электродом.

Плавное формирование проплава может быть достигнуто также путем аргонодуговой сварки в потолочном положении неплавящимся электродом. При оптимальном режиме сварки в этом случае обеспечивается форма шва без занижения и без провисания проплава. При сварке соединений с толщиной кромок более 4 мм делают чашеобразную разделку с притуплением толщиной 2,0—3,0 мм со стороны сварки. Место разделки заполняют в нижнем положении методами автоматической сварки плавящимся электродом [12]. Предпочтительным соединением является стыковое. Нахлесточные и замковые соединения применять не разрешается. Тавровые соединения необходимо выполнять с полным проваром и двусторонней галтелью с плавными переходами к основному металлу.

Сварные детали из конструкционных высокопрочных сталей рекомендуется изготовлять из металла, улучшенного вакуумно-дуговым или электрошлаковым переплавом, обладающего более высокими пластическими свойствами, изотропностью свойств вдоль и поперек волокна и содержащего минимальное число газовых и неметаллических включений.

Высокопрочная сталь 30ХГСНА является сталью перлитного класса. Детали из этой стали можно обрабатывать с получением следующих пределов прочности: 160—180 кгс/мм² после закалки в масле с последующим низким отпуском или после изотермической закалки с низким отпуском; 150—170 кгс/мм² и 140—160 кгс/мм² только после изотермической закалки.

При изготовлении сварных деталей предпочтительней применять изотермическую закалку вместо закалки в масле с отпуском, так как в первом случае изделия имеют меньшую поводку, а сварные соединения и основной металл обладают более высокой пластичностью и вязкостью.

Сталь 30ХГСНА предназначена для ответственных сварных изделий с толщиной в месте сварки до 40 мм. Сварные изделия из стали 30ХГСНА следует применять с определенными ограничениями из-за высокой чувствительности стали к концентраторам напряжений, особенно при многократной статической нагрузке, и к водородной хрупкости. Изготовлять сварные резервуары из стали 30ХГСНА не рекомендуется. Конструкции из стали 30ХГСНА можно изготовлять из термически обработанных элементов и подвергать термообработке (закалке) после сварки. Однако в том и другом случае равнопрочность обеспечивается соответствующим утолщением кромок, так как максимальные напряжения в околошовной зоне из-за чувствительности к концентрациям напряжений не должны быть выше 60—70% прочности основного металла (порядка 100 кгс/мм²). Переход от сварного шва к основному металлу должен быть плавным. Присадочный металл шва должен иметь повышенную пластичность и вязкость по сравнению с пластичностью и вязкостью основного металла. Прочность шва в зависимости от толщины свариваемой детали и марки присадочной проволоки при термической обработке изделия после сварки изменяется в пределах 120—80 кгс/мм², а при сварке предварительно закаленных деталей — в пределах 60—50 кгс/мм².

Низколегированные стали 30Х2ГСНВМ и 42Х2ГСНМ мартенситного класса применяют для изготовления изделий ответственного назначения, в том числе обечаек для емкостей, работающих под давлением при температуре до 300° С и подвергающихся термической обработке (закалке с отпуском) после сварки. При этом допустима сварка в окончательно упрочненном состоянии только кольцевых, менее нагруженных швов, при утолщенных кромках в местах сварки. Конструкционные среднелегированные стали 28Х3СНМВФА, 33Х3СНМВФА, 43Х3СНМВФА относятся к сталям мартенситного класса, обеспечивающим в сварных конструкциях прочность соответственно от 160 до 200 кгс/мм². Эти стали достаточно надежно работают в условиях повторно-статических нагрузок. При сварке с последующей упрочняющей термической обработкой изделий достигается прочность сварных соединечий не ниже 0,9 прочности основного металла. Эти стали имеют низкое содержание серы и фосфора ($S + P \leqslant 0{,}025\%$), а также других примесей, отличаются повышенной чистотой по газонасыщенности и неметаллическим включениям. Эти стали в некоторых случаях выплавляют с применением ЭШП и ВДП.

Из стали 28Х3СНМВФА изготовляют цилиндрические и шаровые баллоны высокого давления, днища, шпангоуты, обечайки для емкостей ответственного назначения и др. Сварные соединения стали 43Х3СНМВФА обладают более высокой чувствительностью к концентраторам напряжений, чем стали 28Х3СНМВФА, поэтому из стали 43Х3СНМВФА изготовляют узлы простой конфигурации с минимальным числом сварных швов. Швы выполняют только встык, с зачисткой мест усиления и проплава.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В сварных соединениях закаливающихся конструкционных сталей образуются зона литой структуры металла шва с химическим составом, как правило, отличным от химического состава основного металла, зона закалки с частично перегретой крупнозернистой структурой и зона отпуска. Механические свойства перечисленных зон и сварного соединения могут изменяться в широких пределах для одного и того же свариваемого материала в зависимости от структуры металла перед сваркой, химического состава присадочной проволоки, метода и технологии сварки и режима последующей термической обработки сварного соединения. Минимальный

предел прочности сварного соединения в зависимости от состояния металла перед сваркой и последующей термической обработки определяется прочностью основного металла в случае сварки стали в состоянии отжига, прочностью зоны отпуска при сварке металла, предварительно упрочненного закалкой, прочностью металла шва в случае упрочняющей термической обработки после сварки.

В зависимости от размеров сварной конструкции, деформируемости ее при высокотемпературном нагреве, требований, предъявляемых к соединениям, наличия оборудования для термической обработки, а также экономичности изготовления конструкции сварные соединения из среднелегированных сталей можно подвергать или не подвергать термической обработке. При этом технология сварки зависит от вида термической обработки соединений после сварки.

Сварные соединения, подвергающиеся полной термической обработке, применяют во всех случаях изготовления ответственных и тяжело нагруженных конструкций, когда это возможно, т. е. если позволяют габаритные размеры конструкции и обеспечиваются условия предупреждения коробления при термической обработке. После полной термической обработки сварное соединение, как правило, становится равноценным основному металлу по всему комплексу физико-химических свойств при условии, что химический состав металла шва и свариваемой стали будет одинаков.

В некоторых случаях при этом механические свойства металла шва могут быть выше, чем механические свойства основного металла, за счет более благоприятной структуры первичной кристаллизации и большей химической однородности по сравнению с катаным металлом, полученным из относительно крупных слитков. Механические свойства сталей 28Х3СНМВФА и 42Х2ГСНМ ($\delta = 4$ мм) и металла шва, выполненных электронно-лучевой и аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом с поперечными колебаниями, приведены в табл. 4. Термическая обработка сварного соединения после сварки и основного металла была одинаковой (закалка и отпуск).

4. Механические свойства основного металла и металла швов сталей 28Х3СНМВФА и 42Х2ГСНМ

Сталь	Сварка	Участок соединений	$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ	ψ	$a_н$, кгс · м/см²
			кгс/мм²		%		
28Х3СНМВФА	Аргонодуговая с поперечными колебаниями	Шов Основной металл	187 170	158,2 152	11,5 8,3	56,8 47,4	5,5 4,8
42Х2ГСНМ	Электронно-лучевая	Шов Основной металл	184 182,8	— 144,1	15,6 9,6	51,5 26	5,2 4,3

Однако иногда наблюдаются случаи, когда металл шва, близкий к основному металлу по химическому составу, после термической обработки обладает худшими вязкостью и пластичностью. Это связано с повышенным содержанием газов, серы и фосфора в металле шва, образованием микродефектов, неполным устранением химической неоднородности и столбчатой структуры после термической обработки, проводимой не по оптимальному режиму, и другими причинами. Подобные случаи наблюдаются при газовой сварке, сварке под кислыми флюсами и в некоторых других случаях.

При сварке закаливающихся сталей иметь одинаковый химический состав металла шва и основного металла не всегда представляется возможным из-за опасности образования кристаллизационных трещин. Особенно это относится к среднелегированным сталям средних и больших толщин с повышенным содержанием углерода, никеля и кремния. В этих случаях прибегают к применению присадочной проволоки с пониженным содержанием указанных элементов, обеспечивающей

легирование шва элементами, повышающими стойкость против трещинообразования (марганцем, хромом, титаном). При выборе состава проволоки нужно учитывать, что часть легирующих элементов и углерода поступает в шов из основного металла в соответствии с долей его участия в образовании шва. Эта доля определяется методом и режимом сварки и может изменяться в пределах 15—80%.

В сварных соединениях, подвергающихся полной термической обработке, можно меньше считаться с влиянием первичной структуры на свойства металла шва, чем в соединениях, не подвергающихся термической обработке. Грубозернистая структура участка перегрева околошовной зоны при термической обработке полностью устраняется. Это позволяет применять высокопроизводительные методы сварки, когда может образоваться первичная грубокристаллическая структура, — электрошлаковую сварку, сварку под флюсом при большой погонной энергии.

Более сложно обеспечить равнопрочность и высокую работоспособность сварных соединений при сварке сталей в термически обработанном упрочненном состоянии. Прочность сварного соединения, не подвергнутого термической обработке после сварки, зависит от того, насколько изменяется структура и прочность основного металла в околошовной зоне и металла шва под влиянием нагрева при сварке. Наименее прочной при этом является зона высокого отпуска. Прочность металла в этой зоне и ширина ее зависят от марки стали и способа сварки. Чем более теплоустойчива сталь, тем менее она разупрочняется при сварке; чем быстрее протекает сварка и меньше тепловложение, тем уже зона термического влияния и тем в меньшей степени снижается прочность основного металла. Сталь 12Х2НВФА не разупрочняется при сварке как более теплоустойчивая, а сталь 30ХГСА менее теплоустойчива и разупрочняется в среднем на 20%. При газовой сварке сталей типа 30ХГСА механические свойства снижаются в большей степени, чем при дуговой. Зона термического влияния при газовой сварке распространяется на ширину 30—80 мм в зависимости от толщины свариваемых кромок, тогда как при дуговой сварке эта зона равна 4—6 мм. При этом в случае газовой сварки прочность сварных соединений равна 65—70 кгс/мм², а при дуговой сварке 100—110 кгс/мм² при прочности основного металла 120 кгс/мм². Снижение прочности металла в зоне высокого отпуска связано с прочностью основного металла до сварки. Например, для сварного соединения стали 30ХГСА, выполненного электродами ВИИ0-6 (Св-18ХМА), наблюдается следующая зависимость:

$\sigma_в$ сварного соединения в зоне отпуска, кгс/мм²	100—110	85—95	70—80
$\sigma_в$ основного металла до сварки, кгс/мм²	130	100—110	70—80

Прочность в зоне закалки (при нагреве выше точки Ac_3) для стали одной и той же марки не зависит от прочности стали до сварки. На сталях типа 30ХГСА в околошовной зоне со структурой крупноигольчатого мартенсита предел прочности достигает 180 кгс/мм². Однако прочность этой зоны определяется не столько пределом прочности, сколько пластическими и вязкими ее свойствами, ее чувствительностью к хрупкому разрушению. При концентрации напряжений в этой зоне, сложнонапряженном состоянии, при низких температурах и других условиях, благоприятствующих хрупкому разрушению, реальная конструктивная прочность в 1,5—2 раза ниже предела прочности, определенного на гладких разрывных образцах. Это же относится и к металлу шва, имеющему состав, близкий к составу основного металла. Поэтому сварку деталей без последующей термической обработки рекомендуется применять преимущественно для среднелегированных сталей с $\sigma_в \leqslant 100 \div 110$ кгс/мм², при которых пластичность и вязкость металла шва и прилегающей зоны можно обеспечить достаточно высокими (как, например, для стали 12Х2НВФА). Необходимая работоспособность термически необработанных сварных соединений закаливающихся сталей при наличии хрупких закалочных структур в околошовной зоне может быть обеспечена путем применения присадочных проволок, обеспечивающих высокие пластичность и вязкость металла шва при определенном снижении его прочности.

При сварке ответственных конструкций из среднелегированных сталей, не подвергающихся последующей термической обработке, в тех случаях, когда равнопрочность не является обязательным условием, для обеспечения высокой пластичности и вязкости швов используют сварочную проволоку с высоким содержанием легирующих элементов (Св-07Х25Н13; Св-08Х20Н9Г7Т), обеспечивающих получение металла шва с устойчивой аустенитной структурой при $\sigma_в \approx 55$ кгс/мм^2. Эти свойства шва сохраняются и при низких температурах и при ударных нагрузках. В этом случае резко повышается стойкость против образования трещин в околошовной зоне.

Для обеспечения работоспособности реальных сварных конструкций из закаливающихся сталей без термической обработки после сварки необходимо предусматривать меры, предупреждающие хрупкие преждевременные разрушения при работе изделий в условиях низких температур, опасных концентраторов напряжений и наличия остаточных сварочных напряжений.

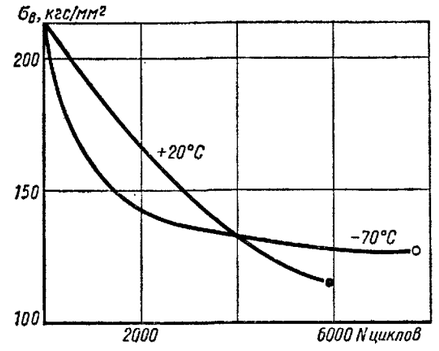


Рис. 3. Влияние температуры испытания на изменение циклической прочности

С понижением температуры для основного металла и металла шва прочность ($\sigma_т$; $\sigma_р$; $\sigma_в$; HB) повышается, а пластичность и вязкость (δ_5, ψ, $a_н$) снижаются. При наличии закалочных структур в сварных соединениях, не подвергнутых термической обработке, эти изменения могут резко усугубить опасность хрупкого разрушения. Например, сварные швы стали 30ХГСА, выполненные электродами ВИ10-6 при + 20° С, имеют ударную вязкость $a_н = 4 \div 5$ кгс·м/см^2, при — 40° С $a_н = 2{,}5 = 3{,}6$ кгс·м/см^2, при — 70° С $a_н = 0{,}8 \div 1{,}8$ кгс·м/см^2. Ударная вязкость в последнем случае является недопустимой для надежной работы конструкции. При сварке аустенитными электродами перечисленные показатели не изменяются в диапазоне температур + 20° С, — 70° С и ниже. Чувствительность металла сварных швов к низким температурам проявляется также при повторном статическом нагружении (при изгибе или растяжении). На рис. 3 приведен пример снижения прочности при повторно-статических нагрузках при понижении температуры испытания швов стали 30ХГСНА, выполненных ручной дуговой сваркой электродами ВИ10-6 (Св-18ХМА). При этом в металле шва наблюдаются структура сорбита с грубым строением и крупные выделения феррита и цементита игловидной формы. В случае применения термической обработки после сварки эти неблагоприятные структуры могут быть полностью устранены. При соответствующих технологических приемах сварки улучшение структуры со снижением структурной и химической неоднородности может быть достигнуто и без последующей термической обработки.

Остаточные напряжения в сварных конструкциях при статических однократных нагружениях, как правило, не снижают прочности, за исключением сложных конструкций с большим скоплением швов при низкой пластичности металла. Однако при повторно-статических и вибрационных нагружениях эти напряжения становятся опасными. При этом опасны не только максимальные растягивающие напряжения в эпюре остаточных напряжений, но и общая площадь, находящаяся под воздействием растягивающих напряжений, т. е. общее количество упругой энергии, затраченное металлом на сопротивление этим напряжениям. Чем это значение выше, тем более затруднена релаксация напряжений в местах концентраций и вероятнее хрупкое разрушение. С этой точки зрения сварка источниками с большой плотностью тепловой энергии, например аргонодуговая (особенно

в импульсном режиме), плазменная, электронно-лучевая, обеспечивает более надежное работоспособное соединение, чем газовая сварка или сварка под слоем флюса.

Эффективным средством повышения работоспособности при повторно-статических и вибрационных нагрузках является поверхностная обработка (вибронаклеп, обработка дробью, обкатка роликами, наклеп пневмомолотком). Поверхностная обработка снимает остаточные напряжения растяжения и создает напряжения сжатия в поверхностном слое, улучшает поверхность и устраняет концентраторы путем создания плавных переходов от шва к основному металлу и устранения поверхностных дефектов. Проковка сварных стыковых соединений снижает сварочные остаточные напряжения вдоль шва на 75%; проковка перекрестных швов снижает остаточные сварочные напряжения в месте их пересечения в 2—4 раза. Наклеп дробью, пневмомолотком или обкаткой роликом существенно не влияет на предел прочности сварного соединения и ударную вязкость, однако обеспечивает высокий упрочняющий эффект при повторно-статических и вибрационных нагружениях. Предел выносливости сварных соединений при этом увеличивается на 30—60%, а долговечность, т. е. число нагружений, в 3—5 раз. Поверхностный наклеп является эффективным как для сварных изделий без термической обработки, так и для изделий, термически обработанных после сварки.

При необходимости несколько повысить механические свойства металла шва и околошовной зоны и снять сварочные напряжения иногда прибегают к высокому или низкому отпуску конструкций после сварки. Высокий отпуск (нагрев до 600—650° С) более эффективен, чем низкий (до 200—300° С), так как обеспечивает снятие сварочных напряжений и устраняет закалку металла шва и околошовной зоны. При этом прочность сварного соединения несколько понижается, а пластичность и ударная вязкость существенно повышаются. Отпуск не обеспечивает перекристаллизации металла и, следовательно, не может устранить ни столбчатой структуры шва, ни перегрева в околошовной зоне. Для этой цели необходимо применять те же технологические мероприятия, что и в случае сварки без последующей термической обработки.

Повышение пластичности и вязкости металла шва в результате отпуска допускает его большее легирование, по сравнению с легированием швов, не подвергающихся термической обработке. В связи с этим в соединениях, подвергающихся отпуску, превращение переохлажденного аустенита в металле шва может происходить в области бейнитного и мартенситного превращения с образованием игольчатой структуры (чего нельзя допускать в швах без термической обработки). При отпуске такой металл приобретает высокую пластичность и вязкость в сочетании с достаточно высокой прочностью. Если подвергнуть отпуску соединения, не повышая легирования металла шва, то прочностные и вязкие свойства его могут заметно снизиться. Сварка с присадочной проволокой, состав которой аналогичен составу основного металла, или сварка путем переплава основного металла без присадочной проволоки в этом случае являются обоснованными. Этот вариант часто применяют для сварки высокопрочных сталей типа 28Х3СНМВФА, 33Х3СНМВФА, 43Х3СНМВФА, 42Х2ГСНМ и 30Х2ГСНВМ. При изготовлении ответственные изделия из высокопрочных сталей с $\sigma_в \geqslant 150$ кгс/мм^2 (например, крупногабаритные емкости, работающие под давлением) с целью повышения пластических и вязких свойств подвергают местному высокотемпературному отпуску с регламентированной шириной зоны отпуска с помощью индукторов ТВЧ. Эту операцию выполняют преимущественно на кольцевых швах, соединяющих предварительно упрочненные обечайки, обечайки со шпангоутами, стыки трубопроводов и др. При выборе оптимальной ширины зоны разупрочнения, несмотря на более низкую прочность (60—70% прочности основного металла), обеспечивается равнопрочность емкостей, работающих под давлением, и высокая надежность при повторно-статических нагружениях [10].

Для сталей типа 28Х3СНМВФА ширина разупрочненной зоны при диаметре сосуда 1 м может достигать 20—30 мм при сохранении равнопрочности без применения утолщения в месте соединения. Местный индукционный нагрев сварного соеди-

нения с образованием зоны, регламентированной по механическим свойствам и ширине, позволяет не применять общую термическую обработку конструкции, сваривать элементы из высокопрочных среднелегированных сталей в упрочненном состоянии и обеспечивает надежную равнопрочность и работоспособность изделия. Местный отпуск после сварки, без снятия изделия со стапеля, гарантирует от появления холодных сварочных трещин.

ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СВАРКЕ

При разработке технологических процессов сварки среднеуглеродистых и легированных конструкционных сталей, для обеспечения надежных с заданными эксплуатационными характеристиками изделий необходимо предусматривать некоторые положения.

1. Правку, вальцовку, штамповку и другие операции формообразования свариваемых заготовок выполнять в отожженном состоянии.

2. Подготовку свариваемых кромок выполнять на металлорежущих станках (строгание, фрезерование, точение, резку на ножницах тонких листов), что обеспечивает необходимую точность сборки и отсутствие изменения структуры металла в месте реза. Газовую резку при подготовке кромок можно применять как исключение в условиях монтажа крупногабаритных сооружений для сталей с прочностью до 100 кгс/мм^2.

3. Поверхность металла в зоне сварки очищать от окалины, ржавчины и других загрязнений, а также от влаги. Перечисленные загрязнения создают условия для образования пористости, окисных включений, а в некоторых случаях и трещин в металле шва (за счет насыщения металла водородом). Зачистку производить на участке шириной не менее 10—15 мм как сверху, так и снизу свариваемых кромок, а также торца, если последний имеет окисленную поверхность. Зачистку производят, как правило, вручную абразивными кругами и щетками, или на пескоструйных и дробеструйных аппаратах. Сказанное относится ко всем типам соединений: стыковым, угловым, тавровым и т. д.

4. В случае сварки деталей, упрочненных термической обработкой, особенно крупногабаритных, подготовку кромок под сварку (подрезку торца, выполнение разделки кромок) и их зачистку следует выполнять после термической обработки для обеспечения необходимых точности сборки свариваемых деталей и параметров шероховатости поверхности.

5. При сборке деталей под сварку обеспечивать надежное закрепление деталей относительно друг друга. При этом смещение кромок должно быть минимальным и не превышать 10—15% толщины свариваемых кромок. Зазоры между кромками должны быть минимальными и постоянными по величине за исключением специальных случаев сварки в щелевой зазор. Сварочные приспособления должны обеспечивать фиксирование свариваемых деталей, предупреждая изменение зазора и смещение кромок в процессе сварки.

6. При необходимости прихваток для фиксирования деталей в месте сварки их размеры и расположение должны обеспечивать необходимую прочность и возможность полной переварки при укладке основных швов. Прихватки выполняют с особой тщательностью, их металл не должен иметь пор и трещин. Кратеры прихваток должны быть заварены. Перед наложением основного шва прихватки необходимо тщательно зачищать.

7. Сварку среднеуглеродистых сталей (35, 40 и др.) следует выполнять так, чтобы снизить содержание углерода в металле шва, что достигается применением присадочной проволоки с низким содержанием углерода и уменьшением доли основного металла в металле шва. Следует также обеспечить получение швов с большим коэффициентом формы, выбрать режимы сварки и число слоев с учетом получения минимальной зоны термического влияния, предупреждения опасного роста зерна в зоне перегрева и по возможности отсутствия хрупких закалочных структур. Последнее часто может быть обеспечено применением предварительного

подогрева до 250—300° С. Многослойная сварка одной или двумя раздвинутыми дугами электродами малого диаметра, применение низкоуглеродистых или низколегированных проволок (Св-08А, Св-08ГА, Св-10Г2) в сочетании с флюсами или покрытиями, дополнительно легирующими шов марганцем и кремнием (флюс АН-348-А, электроды УОНИ-13/55 и др.), способствуют получению работоспособных сварных швов. Наиболее часто применяют ручную дуговую сварку покрытыми электродами и автоматическую сварку под флюсом. При изготовлении крупногабаритных толстостенных конструкций целесообразно применять электрошлаковую сварку как высокопроизводительный процесс, позволяющий за один проход сваривать металл неограниченной толщины.

8. Перечисленные мероприятия не предотвращают полностью закалки металла в околошовной зоне, и для получения высоких пластичных и вязких свойств сварного соединения необходимо применять последующую термическую обработку — отпуск или закалку с отпуском, особенно при наличии соединений больших толщин. На среднеуглеродистых сталях удовлетворительное соединение можно получить всеми видами сварки, за исключением газовой. После сварки необходим отпуск при 650° С; изделия сложной конфигурации и с толщиной стенок более 15 мм сваривают с предварительным подогревом до 200°С. Стали 10Г2А и 12Г2А используют в конструкциях при толщине листов до 4 мм. Стали сваривают всеми видами сварки, в том числе и газовой. Конструкции можно изготовлять из нормализованных элементов без термической обработки после сварки. При сварке легированных конструкционных сталей режимы сварки, технику сварки и сварочные материалы выбирают из необходимости предупреждения образования холодных трещин в шве и околошовной зоне и обеспечения конструктивной прочности сварного соединения, равной прочности основного металла. Для этого в технологическом процессе необходимо предусмотреть выполнение рекомендаций, изложенных при рассмотрении средств борьбы с холодными трещинами. Сварку производят по возможности без перерывов. Ветер и сквозняк, а также низкая температура при сварке не допускаются. При возрастании тока увеличивается нагрев стали в зоне шва и замедляется ее охлаждение. В результате этого сталь закаливается слабее. Однако повышенными режимами следует пользоваться с осторожностью, так как может возникнуть опасность значительного перегрева в околошовной зоне и образование горячих кристаллизационных трещин в шве из-за появления грубой дендритной структуры. Для уменьшения закалки основного металла сварку производят в несколько проходов. При многослойной сварке отдельные накладываемые валики должны быть одинакового сечения. При этом зона отпуска от наложения последующих валиков частично проходит по зоне закалки предыдущих валиков и отпускает ее, что приводит к равномерному отпуску всей зоны термического влияния. При наложении валиков разного сечения около шва остаются прослойки закаленной стали, которые могут дать закалочные трещины. Последний валик, называемый отжигающим, необходимо накладывать при температуре шва 300° С таким образом, чтобы он не касался основного металла и зона закалки от него не переходила на основной металл. Правильная форма шва имеет особое значение при сварке закаливающихся легированных сталей. Недопустимы подрезы и непровары в сварных швах. Неровности шва, резкие переходы от шва к основному металлу, грубые проплавы и т. п. могут служить очагами появления трещин или приводить к хрупким разрушениям при нагружении изделия. Для улучшения формы перехода от шва к основному металлу, например, при сварке трубчатых конструкций с угловыми швами, применяют наложение дополнительных сглаживающих валиков газовой или аргонодуговой сваркой (сварка с усом). С этой же целью осуществляют и механическую обработку швов.

9. При изготовлении сварных изделий из легированных сталей с пределом прочности 100 кгс/мм^2 и более применяют следующие виды термической обработки: а) предварительную до сварки с целью снятия остаточных напряжений после гибки, штамповки и т. п. путем отжига или придания деталям перед сваркой соответствующих механических свойств с помощью закалки и отпуска; б) промежуточную для устранения повышенной твердости шва и зоны закалки (с целью выпол-

нения последующей правки) путем отпуска при 650—680° С и для предупреждения образования холодных трещин путем местного или общего отпуска при 200—600° С; в) окончательную для придания сварному изделию требуемых высоких механических свойств и улучшения структуры сварного соединения.

10. Сталь 12Х2НВФА хорошо сваривается дуговой и контактной сваркой всех видов, удовлетворительно-газовой и атомно-водородной сваркой.

Отпуск после сварки для снятия остаточных напряжений применяют только в сварных изделиях со значительной толщиной свариваемых кромок (более 15 мм) при наличии скопления швов, швов сложной конфигурации и прочих условий, способствующих формированию сложнонапряженного состояния с высоким уровнем максимальных растягивающих напряжений. Стали 25ХГСА и 30ХГСА сваривают сваркой всех видов. Сталь 30ХГСА обладает повышенной склонностью к трещинообразованию при сварке. Для снятия внутренних напряжений после сварки необходимо применять отпуск. Конструкции, термически обрабатываемые после сварки на заданную прочность, в случае длительного разрыва между сваркой и термической обработкой также подвергают отпуску при 650° С. При большом числе швов на узлах из указанных сталей, создающих жесткую систему (большое число ребер жесткости и др.), рекомендуется производить промежуточный высокий отпуск после сварки определенного числа швов. Конструкции, изготовляемые из термически обработанных элементов, подвергают отпуску при температуре на 50° С ниже температуры отпуска после закалки. Допускается отпуск при 250° С с выдержкой не менее 2 ч. Детали из стали 30ХГСА толщиной более 3 мм (сварка в отожженном состоянии), имеющие швы с особо жесткими контурами, во избежание образования трещин рекомендуется сваривать с подогревом до температуры 250—350° С, которую нужно поддерживать в течение процесса сварки. Подогрев может быть как местным, так и общим, но обязательно равномерным по всему периметру сварного шва и близлежащих зон на ширине не менее 100 мм по обе стороны от шва. В особо сложных сварных узлах не исключено применение подогрева и для сталей 25ХГСА и 23Х2НВФА. Сталь 23Х2НВФА сваривают контактной сваркой; удовлетворительно — дуговой сваркой всех видов. После сварки деталь необходимо подвергать отпуску при 500° С. Отпуск деталей сложной конфигурации нужно производить немедленно после сварки.

11. Сталь 30ХГСНА сваривают ручной дуговой, автоматической под флюсом, аргонодуговой и атомно-водородной сваркой. Газовую и контактную сварку не применяют. Атомно-водородную сварку применяют только для отожженных деталей и используют только при условии полной термической обработки узла после сварки и толщине свариваемых элементов до 6 мм, а также для выполнения первого слоя при многослойной сварке деталей большой толщины. Сталь 30ХГСНА склонна к образованию холодных трещин в сварных соединениях. Детали после сварки необходимо подвергать отпуску при 650° С. Время, затрачиваемое на перенос деталей в печь, должно быть минимальным, чтобы металл в месте сварки не остыл до температуры ниже 250° С. При значительной протяженности сварных швов сварку надо производить в несколько приемов с промежуточными отпусками. Сложные конструкции с замкнутыми швами сваривают в подогретом состоянии при 200—300° С. Детали простой формы можно сваривать без подогрева. Сварку конструкций, изготовленных из закаленных элементов, производят с подогревом до 200—250° С. После сварки эти конструкции подвергают отпуску при 200—250° С с выдержкой в течение 3 ч. Отпуск при этом нужно производить не позднее, чем через 1 ч после сварки.

12. Высокопрочные стали 30Х2ГСНВМ и 42Х2ГСНМ сваривают в среде нейтральных защитных газов (аргона или гелия). Для обеспечения заданных свойств сварных соединений конструкции подвергают термической обработке (закалке с отпуском). Предварительно, после сварки должен быть произведен местный отпуск с помощью ТВЧ или общий отпуск в печи с промежуточным временем от момента окончания сварки до проведения отпуска не более 30 мин.

В случае повышенной склонности к образованию холодных трещин металла отдельных партий рекомендуется подогрев деталей (или кромок) перед сваркой

до 200—250° С. Листовые конструкции с толщиной листов 3—4 мм и менее сваривают без подогрева. При невозможности термической обработки всей конструкции из стали 42Х2ГСНМ после сварки из-за больших размеров или для сохранения геометрических параметров рекомендуется применять переходники с большей толщиной стенки из стали 30Х2ГСНВМ, приварку которых к узлам и деталям из стали 42Х2ГСНМ производят с последующей термической обработкой, а сварку их между собой осуществляют в термически обработанном состоянии. В этом случае допустима только сварка кольцевых швов при утолщенных кромках в местах сварки. Сварные швы на утолщенных кромках подвергают местному отпуску индукционным нагревом с получением $\sigma_в = 100 \div 130$ кгс/мм². Ширина зоны нагрева для получения температуры отпуска не должна выходить за пределы утолщения кромок.

Отпуск с помощью ТВЧ должен производиться не позднее чем через 15 мин после окончания сварки.

Узлы из высокопрочных сталей 28Х3СНМВФА, 33Х3СНМВФА, 43Х3СНМВФА сваривают аргонодуговым методом предпочтительно в отожженном состоянии. Для предупреждения образования холодных трещин не позднее чем через 15 мин после сварки следует произвести высокотемпературный (650° С) или низкотемпературный (250—300° С) стабилизирующий отпуск. Для получения требуемых механических свойств сварную конструкцию подвергают соответствующей термической обработке.

Допускается сварка отдельных узлов в термически обработанном состоянии кольцевыми швами с последующим местным индукционным отпуском на регламентируемую ширину в зависимости от механических свойств зоны отпуска и диаметра свариваемых элементов (трубных заготовок, обечаек, шпангоутов). Для стали 43Х3СНМВФА в месте сварки делается утолщение кромок, например, путем раскатки обечаек с оставлением утолщенных кромок и механической обработки их. Местный отпуск после сварки в этом случае аналогичен местному отпуску при сварке стали 42Х2ГСНМ.

РУЧНАЯ ДУГОВАЯ СВАРКА

Для дуговой сварки конструкционных среднеуглеродистых и легированных сталей применяют различные электроды (табл. 5) в зависимости от прочности и пластичности свариваемой стали, а также условий эксплуатации сварных конструкций. Для сварки сталей 40 и 45, а также легированных сталей средней прочности рекомендуется использовать электроды УОНИИ-13/55, УОНИИ-13/65 и УОНИИ-13/85 [17]. Эти электроды обеспечивают высокую пластичность и ударную вязкость металла шва и стойкость против образования трещин.

Для сварки материала толщиной до 2,0 мм применяют электроды ВИАМ-25 с тонким стабилизирующим покрытием. Эти электроды используют также независимо от толщины свариваемого материала для сварки трубчатых элементов, выполнения коротких швов и швов, расположенных в труднодоступных местах. Сварные соединения, выполненные тонкообмазанными электродами, имеют резкие переходы к основному металлу, обладают низкой прочностью при вибрационных и повторных статических нагрузках. Для повышения динамической прочности в местах концентрации напряжений следует создавать плавные переходы к основному металлу с помощью запиливания, комбинированного способа сварки, наклепа и т. п.

Для сварки сталей средней и высокой прочности при толщинах более 2,0 мм наряду с электродами типа УОНИИ-13 рекомендуются электроды ВИ10-6 (Св-18ХМА) и НИАТ-3М (Св-08А) [17]. Для получения швов с высокими пластическими свойствами и малой чувствительностью к концентраторам напряжений рекомендуется применять электроды со сварочной проволокой, обеспечивающей аустенитную структуру шва. В этом случае прочность шва ниже прочности основного металла ($\sigma_в \approx 60$ кгс/мм²). Однако работоспособность конструкций в условиях динами-

5. Электроды для дуговой сварки конструкционных сталей и механические свойства сварных соединений

Марка стали	Термическая обработка	Электрод		Механические свойства, не менее	
		Тип	ГОСТ	$\sigma_в$, кгс/мм²	$a_н$, кгс·м/см²
45	Без термообработки или закалка и отпуск после сварки	Э55	9467—75	0,9 $\sigma_в$ основного металла	12
10Г2А 12Г2А	Без термообработки или с последующей нормализацией	Э60 Э70	9467—75	0,9 $\sigma_в$ основного металла	7 6
25ХГСА 30ХГСА	Закалка и отпуск после сварки на $\sigma_в \leqslant 90$ кгс/мм²	Э70 Э85	9467—75	0,9 $\sigma_в$ основного металла	6 5
25ХГСА, 30ХГСА	Закалка и отпуск после сварки на $\sigma_в \geqslant 90$ кгс/мм²	Э85	9467—75	0,9 $\sigma_в$ основного металла при толщине до 10 мм, 90 при толщине 10—20 мм, 80 при толщине > 20 мм	5
25ХГСА 30ХГСА	Сварка в упрочненном состоянии без последующей термической обработки	Э-11Х15Н25М6АГ2	10052—75	60 при толщине до 10 мм, 55 при толщине 10—20 мм, 50 при толщине > 20 мм	10
12Х2НВФА	Закалка и отпуск после сварки на $\sigma_в \geqslant 100$ кгс/мм²	Э85 Э100	9467—75	0,95 $\sigma_в$ основного металла	6 5
12Х2НВФА	Сварка в упрочненном состоянии без последующей термической обработки	Э85 Э-11Х15Н25М6АГ2	9467—75 10052—75	90 60	6 10
23Х2НВФА	Закалка и отпуск после сварки на $\sigma_в \geqslant 115$ кгс/мм²	Э85	9467—75	0,9 $\sigma_в$ основного металла	6
23Х2НВФА	Сварка в упрочненном состоянии без последующей термической обработки	Э85 Э-11Х15Н25М6АГ2	9467—75 10052—75	110 60	5 10
30ХГСНА	Закалка и отпуск после сварки на $\sigma_в = 160 \div 180$ кгс/мм²	Э85, Э100	9467—75	120 при толщине 4—10 мм, 100 при толщине 10—15 мм, 90 при толщине 15—20 мм, 80 при толщине > 20 мм	5
30ХГСНА	Сварка в упрочненном состоянии без последующей термической обработки	Э-11Х15Н25М6АГ2, Э-06Х19Н11Г2М2*	10052—75	60 при толщине 4—15 мм, 55 при толщине 15—20 мм, 50 при толщине > 20 мм	10

* Только по слоям, наплавленным присадками типа Э-11Х15Н25М6АГ 2.

ческих и ударных нагрузок при аустенитной структуре шва обеспечивается значительно более высокая. Например, при изготовлении конструкций из термически обработанных элементов для заделки концов неврезных соединений (в трубчатых соединениях, приставных косынках и накладках) рекомендуются электроды типа Э-11Х15Н25М6АГ2.

Для сварки низколегированных сталей не следует применять такие сварочные проволоки, как Св-06Х19Н9Т, Св-13Х25Н18, Св-08Х21Н10Г6 и им подобные, поскольку сварные соединения в зоне перемешивания с основным металлом приобретают хрупкость из-за недостаточного запаса аустенитности.

Детали из стали 30ХГСНА с жесткими замкнутыми швами и толщиной свариваемых элементов более 15 мм в случае образования трещин при применении электродов типа Э-11Х15Н25М6АГ2 сваривают по определенной технологии. Перед сваркой на кромки сварного соединения наплавляют слои толщиной 2—3 мм электродами типа Э-11Х15Н25М6АГ2 (рис. 4, *а*). Сварку по наплавленным слоям (рис. 4, *б*) производят электродами типа Э-06Х19Н11Г2М2.

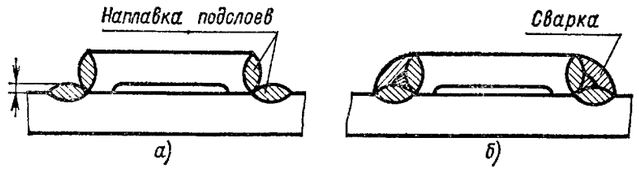


Рис. 4. Последовательность наложения валиков при сварке стали 30ХГСНА аустенитными электродами

Швы, выполненные электродами типа Э-11Х15Н25М6АГ2, имеют предел прочности 50—60 кгс/мм². Поэтому при выполнении швов, воспринимающих значительные нагрузки, необходимо увеличивать периметр сварных швов (при работе на срез) или толщину деталей в месте расположения сварных соединений.

Сварку низколегированных сталей производят в помещении, где температура должна быть не ниже + 15° С. При этом недопустимы сквозняки. Ориентировочные режимы сварки конструкционных сталей приведены в табл. 6.

6. Ориентировочные режимы сварки конструкционных сталей

Толщина, мм	Стыковое		Тавровое		Нахлесточное	
	I, А	$d_э$, мм	I, А	$d_э$, мм	I, А	$d_э$, мм
1,0	25—35	2	30—50	2	30—50	2,5
1,5	35—50	2	40—70	2—2,5	45—75	2,5
2,0	45—70	2,5	50—80	2,5—3,0	55—85	2,5—3
4,0	120—160	3—4	120—160	3—4	120—160	3—4
5,0	130—180	3—4	130—180	4	130—180	4
10,0	140—220	4—5	150—220	4—5	150—220	4—5
15,0	160—250	4—5	160—250	4—5	160—250	4—5
20,0	160—340	4—6	160—340	4—6	160—340	4—6

Примечание. При сварке закаленных элементов аустенитными электродами ток снижают на 25%; $d_э$ — диаметр электрода.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА ПОД ФЛЮСОМ

Автоматическая сварка под флюсом рекомендуется при толщине свариваемого металла свыше 4 мм с получением прямолинейных и кольцевых (диаметром 80 мм и выше) швов. При толщине свариваемого металла менее 4 мм наблюдается короблe-

7. Присадочные материалы при сварке под флюсом и механические свойства сва

Марка свариваемой стали	Термическая обработка	Электродная проволока		Марка флюса	$\sigma_в$, кгс/мм²	$a_н$, кгс · м/см²
		Марка	ГОСТ или ТУ		не менее	
45	Без термической обработки или закалка и отпуск после сварки	Св-08А	ГОСТ 2246–70	ОСЦ-45 АН-348-А	0,9 $\sigma_в$ основного металла	—
10Г2А 12Г2А	Без термической обработки или с последующей нормализацией	Св-08А, Св-08ГА, Св-18ХМА		АН-15 АН-348-А	0,9 $\sigma_в$ основного металла	6
25ХГСА 30ХГСА	Закалка и отпуск для стали 25ХГСА на $\sigma_в = 110 \pm 10$ кгс/мм², для стали 30ХГСА на $\sigma_в = 120 \pm 10$ кгс/мм² после сварки	Св-18ХМА		АН-15 АН-348-А	0,9 $\sigma_в$ основного металла	5 4
25ХГСА 30ХГСА	То же, до сварки	Св-10Х16Н25АМ6		АН-15	60	10
12Х2НВФА 23Х2НВФА	Без последующей термической обработки (сварка в упрочненном состоянии); закалка и отпуск для стали 12Х2НВФА $\sigma_в \geqslant 100$ кгс/мм²; для стали 23Х2НВФА $\sigma_в \geqslant 115$ кгс/мм² после сварки	Св-18ХМА		АН-348-А	0,9 $\sigma_в$ основного металла	6 для 12Х2НВФА 4 для 23Х2НВФА
30ХГСНА	Закалка и отпуск на $\sigma_в = 160 \div 180$ кгс/мм²: после сварки	0Х4МА	ЧМТУ ЦНИИчМ 1033–63	АН-15	120	4
		Св-18ХМА	ГОСТ 2246–70		90	6
30ХГСНА	до сварки	Св-10Х16Н25М6	ГОСТ 2246–70	АН-15	60	10
28Х3СНМВФА	Закалка+отпуск на $\sigma_в \geqslant 170$ кгс/мм² после сварки	Св-28Х3СНМВФАВД Св-20ХСНВФА	ТУ 14-1-467–72	АВ-5 или 48-ОФ-10	0,9 $\sigma_в$ основного металла	7–8
30Х2ГСНВМ	Закалка + отпуск на $\sigma_в = 170 \pm 10$ кгс/мм² после сварки	Св-20Х2ГСНВМ Св-20ХСНВФА	ЧМТУ 1-789–69 ТУ 14-1-467–72	АВ-5 48-ОФ-10	0,9 $\sigma_в$ основного металла	—

вание и увеличенное число дефектов в шве. Однако при необходимости под флюсом сваривают и детали с толщиной кромок 2—3 мм. Сварку под флюсом можно производить как на переменном, так и на постоянном токе. Диаметр сварочных проволок 2—5 мм.

Автоматическую сварку под флюсом можно выполнять как с разделкой кромок (при больших толщинах деталей), так и без нее. Для предупреждения прожогов при односторонней сварке применяют остающиеся (стальные) и съемные подкладки (медные или в виде флюсовой подушки). При применении медных подкладок медь может попасть в металл шва, что вызывает образование горячих трещин.

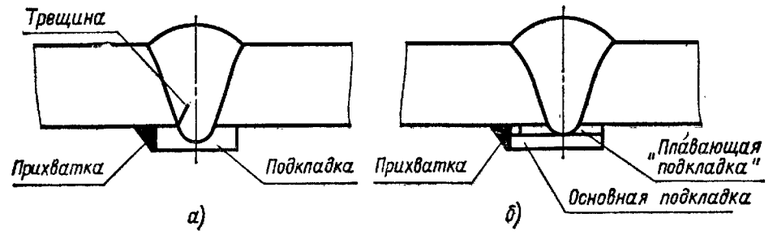


Рис. 5. Схема использования плавающей подкладки, предупреждающей появление трещин корня шва

С целью предупреждения попадания меди и более качественного формирования проплава иногда применяют флюсо-медную подкладку. Применение остающихся приваренных стальных подкладок при сварке высокопрочных сталей в некоторых случаях, например, замыкающих швов сосудов из стали 30ХГСА, приводит к образованию трещин в корне шва (рис. 5, *а*) при сварке, а иногда и при термической обработке (если состав материала подкладки отличен от состава основного металла изделия). В этом случае целесообразно применять дополнительную тонкую «плавающую» подкладку толщиной 1,0—1,5 мм, предупреждающую приваривание основной подкладки (рис. 5, *б*).

Подкладные кольца и замковые соединения для сварки стали 30ХГСНА не рекомендуются, так как они снижают надежность изделия в эксплуатации. Вместо подкладных колец первые слои целесообразно выполнять аргонодуговой сваркой на весу. Электродную проволоку и флюс для сварки конструкционных сталей выбирают согласно табл. 7. Электродную проволоку Св-18ХМА при сварке сталей 10Г2А и 12Г2А целесообразно применять для повышения прочности сварных соединений при статических, вибрационных и повторно-статических нагрузках. Сварку под флюсом АН-348-А производят на постоянном или переменном токе, а под флюсом АН-15 на постоянном токе обратной полярности. Ориентировочные режимы сварки под флюсом сталей 25ХГСА, 30ХГСА и 30ХГСНА приведены в табл. 8.

При сварке легированных сталей под кислыми флюсами ОСЦ-45 и АН-348 наблюдается чувствительность к горячим и холодным трещинам более высокая, чем при сварке качественными электродами или при сварке в защитных газах. Для увеличения сопротивляемости сварных швов к горячим трещинам, а также повышения пластичности и ударной вязкости металла шва используют основные флюсы, такие как АН-26, АН-20, 48-ОФ-10, обеспечивающие более высокую чисто-

8. Ориентировочные режимы сварки проволокой Св-18ХМА диаметром 3 мм под слоем флюса при напряжении дуги 26—32 В

Толщина стали, мм	I, А	$v_с$, м/ч
4–8	280–320	18–25
8–16	300–360	14–25
16–25	300–450	

Примечание. $v_с$ — скорость сварки.

ту металла шва по сере и окисным включениям. Во избежание пористости и наводороживания швов флюсы перед сваркой необходимо прокаливать, с тем чтобы их влажность не превышала 0,1%. Это достигается нагревом флюсов до 300—350° С с выдержкой 2—3 ч. Конструкционные низко- и среднелегированные стали сваривают под флюсом, как правило, без подогрева. Подогрев усложняет ведение сварочного процесса. Только в случае сварки жестких узлов, а также сварки сталей 30ХГСА и 30ХГСНА большой толщины применяют подогрев при 250—300° С.

После сварки во всех случаях необходим общий отпуск при 600° С или местный при 300° С для предупреждения образования холодных трещин. Иногда для сварки сталей 30ХГСА и 30ХГСНА можно использовать высоколегированную коррозионно-стойкую проволоку (см. табл. 7), обеспечивающую аустенитную или аустенитно-мартенситную структуру шва. Прочность таких швов уступает прочности основного металла, однако высокий запас пластичности обеспечивает достаточно хорошую работоспособность конструкции. Наибольшее применение при сварке высокопрочных сталей получила проволока Св-10Х16Н25АМ6.

СВАРКА В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

Дуговую сварку в защитных газах можно осуществлять в среде как инертных, так и активных газов. При этом предпочтение следует отдавать автоматической и полуавтоматической сваркам, обеспечивающим наилучшее качество швов и высокую производительность процесса.

В качестве инертных газов используют чистый аргон Б и В по ГОСТ 10157—73 и технический гелий первого сорта по МРТУ 51-77—66; в качестве активного газа используют сварочный углекислый газ по ГОСТ 8050—76. Сварка может быть осуществлена неплавящимся (вольфрамовым) и плавящимся электродами. При сварке в активном газе применяют только плавящийся электрод. В качестве неплавящихся электродов для ручной и автоматической сварок на постоянном токе прямой полярности применяют вольфрамовые прутки по ТУ ВМ2-529—57, лантанированные вольфрамовые прутки ВЛ-2 и ВЛ-10 по СТУ 45-ЦМ-1150—63, а также прутки из торированного вольфрама ВТ15 по ТУ 11ЯЕ.0021-056—72 и итрированного вольфрама СВИ-1 по ТУ 48-42-73—71; при сварке на переменном токе применяют чистые вольфрамовые прутки по ТУ ВМ2-529—57. Активированный вольфрам при постоянном токе повышает стабильность катодного пятна на конце электрода, вследствие чего повышается устойчивость дуги в широком диапазоне рабочих токов.

При выборе присадочного материала (электродной проволоки) для дуговой сварки в среде защитных газов следует руководствоваться табл. 9.

Для предупреждения образования пор рекомендуется применять присадочные материалы с повышенным содержанием раскислителей Si и Mn (Св-08Г2С; Св-12ГС; Св-08ГСМТ и др.). На свойства металла шва влияет качество углекислого газа. Повышенное содержание в нем водяных паров и воды способствует образованию пор даже при хорошей защите от воздуха и надлежащем количестве кремния и марганца в сварочной ванне. Сварку легированных сталей следует выполнять без присадки или с присадкой, аналогичной или близкой по составу основному металлу.

Для повышения стойкости металла шва против образования горячих трещин при применении плавящегося электрода сварку металла с повышенным содержанием углерода (более 0,25%) рекомендуется выполнять с минимальным расплавлением основного металла. Для предупреждения появления горячих трещин в металле шва при сварке сталей типа «хромансиль» рекомендуется применять сварочную проволоку Св-08Г2СМ по ТУ 14-130-54—73. При многослойной сварке изделий из сталей «хромансиль», подвергаемых упрочняющей термической обработке, рекомендуется применять проволоку Св-08Х3Г2СМ. В качестве защитной среды при сварке проволокой Св-18ХМА рекомендуется газовая смесь аргона с 5% CO_2, обеспечивающая при сварке хорошее формирование сварных швов и незначительное разбрызгивание.

9. Присадочные материалы и механические свойства сварных соединений при дуговой сварке в защитных газах

Марка свариваемой стали	Термическая обработка	Электродная проволока: в среде инертных газов — Марка	Электродная проволока: в углекислом газе — Марка по ГОСТ 2246—70	$\sigma_в$, кгс/мм² (не менее)	$a_н$, кгс · м/см² (не менее)
45, 10Г2А, 12Г2А	Без термической обработки, а также закалка (нормализация) до и после сварки	—	Св-08ГС, Св-10Г2, Св-12ГС, Св-08Г2С	0,9 $\sigma_в$ основного металла	6
25ХГСА, 30ХГСА	Закалка и отпуск после сварки	Св-08А, Св-18ХМА	Св-18ХМА, Св-18ХГСА, Св-10ГСМТ	0,9 $\sigma_в$ основного металла	6 (при $\sigma_в$ основного металла $\leqslant$ 90 кгс/мм²); 4,5 (при $\sigma_в$ основного металла $\geqslant$ 90 кгс/мм²)
12Х2НВФА	Сварка в термически обработанном состоянии без последующей термической обработки	Св-18ХМА	Св-10ГСМТ	0,9 $\sigma_в$ основного металла	6 для 12Х2НВФА, 4 для 23Х2НВФА
23Х2НВФА		Св-10Х16Н25АМ6	—	60	10
12Х2НВФА, 23Х2НВФА	Закалка + отпуск после сварки	Св-18ХМА	Св-10ГСМТ	0,95 $\sigma_в$ основного металла	6, 4
30Х2ГСНВМ	Закалка и отпуск после сварки: на $\sigma_в$ = 170÷10 кгс/мм²	Св-20Х2ГСНВМ	—	0,9 $\sigma_в$ основного металла	—
42Х2ГСНМА	на $\sigma_в$ = 200÷10 кгс/мм²	Св-20ХСНВФАВД	—	(0,9÷0,95) $\sigma_в$ основного металла	—
28Х3СНМВФА, 33Х3СНМВФА, 43Х3СНМВФА	Закалка и отпуск после сварки	Св-18ХМА-Ш, Св-20ХСНВФАВД	—		—

Формирование сварных швов улучшается при сварке конструкционных сталей с использованием смеси газов — аргона и гелия (до 25%); чтобы избежать пористости в шве, а также улучшить устойчивость горения дуги при сварке на переменном токе, дополнительно вводят небольшое количество кислорода (до 1%). При сварке в среде защитных газов легированных конструкционных сталей (25ХГСА, 30ХГСА, 28Х3СНМВФА) и др. иногда наблюдается пористость в сварных швах, вызываемая повышенным содержанием газов, особенно азота в основном металле (более 0,02—0,03%). В этом случае борьба с пористостью путем подбора проволоки, защитных газов, режимов сварки и других технологических мероприятий является малоэффективной, необходим отбор плавок, содержащих менее 0,02% N.

Для формирования сварного шва без выступающего проплава, действующего как концентратор напряжения в месте перехода к основному металлу, в сварных соединениях высокопрочных сталей (28Х3СНМВФА, 30Х2ГСНВМ и др.) мартенситного класса с пределом прочности выше 150 кгс/мм², сварку рекомендуется выполнять вольфрамовым электродом в аргоне в потолочном положении с защитой обратной (верхней) стороны шва газом, состав которого зависит от состава свариваемого металла. Например, при сварке высокопрочных сталей типа 28Х3СНМВФА для защиты с обратной стороны рекомендуется применять углекислый газ или его смесь с 3—5% кислорода.

Неплавящимся электродом рекомендуется сваривать изделия из материала толщиной не более 4—5 мм. Сварку плавящимся электродом можно применять при изготовлении изделий из материалов толщиной 1 мм и выше. Для материала толщиной до 2 мм рекомендуется автоматическая аргонодуговая сварка неплавящимся электродом без присадки или с присадочной проволокой; целесообразна сварка импульсной дугой. При большей толщине сварку производят с применением присадки.

При сварке высокопрочных сталей толщиной 3—5 мм высокое качество сварных соединений может обеспечиваться при сварке по методу ИЭС им. Е. О. Патона; первый слой выполняют без присадки с полным проваром кромок стыка, второй — с поперечными колебаниями электрода и механической подачей присадочной проволоки. Глубина проплавления при этом должна быть 60—70% толщины основного металла. Сварку производят короткой дугой с дуговым промежутком 0,5—1,0 мм. Указанный метод сварки применяют для уменьшения перегрева сварного соединения, получения благоприятной кристаллизации металла шва, уменьшения коробления и повышения механических свойств сварного соединения. При этом возрастают пластичность, вязкость шва, сопротивление развитию трещины и конструктивная прочность сварных соединений; металл шва не имеет столбчатой направленности; не обнаруживается перегрева околошовных зон; шов имеет форму с плавными переходами к основному металлу.

При необходимости сварки на весу рекомендуется применять аргонодуговую сварку переменным током промышленной или повышенной частоты (хотя возможно выполнение сварки и на постоянном токе прямой полярности). Сварку неплавящимся электродом производят без скоса кромок в один проход для толщин 2,5—4,0 мм на переменном токе промышленной частоты, а для толщин 1,0—2,5 мм на токе повышенной частоты.

Сварку неплавящимся электродом на постоянном токе рекомендуется производить в два прохода: для толщин 1—3 мм без разделки кромок, свыше 3 мм — с разделкой. При сварке без разделки кромок первый проход можно осуществлять без присадки, а при сварке с разделкой — как без присадки, так и с присадкой (в зависимости от формирования проплава). Если проплав имеет вогнутую поверхность, то следует применять присадку при сварке как первого, так и второго слоя. При свободном доступе к шву со стороны проплава возможна сварка с двух сторон без присадки. Режим сварки выбирают в зависимости от толщины свариваемой стали (табл. 10).

В процессе сварки обратную сторону сварочного шва надо защищать от воздействия воздуха путем подачи аргона в продольную канавку в подкладке из коррозионно-стойкой стали. Глубина канавки составляет примерно половину толщины свариваемой стали, а ширина — четыре-шесть толщин. Чем меньше толщина свариваемого металла, тем шире зона разогрева основного металла до высоких температур и тем более необходимо защищать его с обратной стороны. Во избежание перегрева сварного соединения и уменьшения его деформаций применяют импульсно-дуговую сварку вольфрамовым электродом на постоянном токе прямой полярности.

10. Режимы сварки неплавящимся электродом

Толщина металла, мм	Сварка встык с присадкой в среде					
	аргона			гелия		
	I, А	$v_с$, м/ч	Расход газа, л/мин	I, А	$v_с$, м/ч	Расход газа, л/мин
0,4	30—45	30—40	4—5	—	—	—
0,5	30—45	25—35	4—5	—	—	—
1,0	60—100	20—30	4,0	40—60	20—30	5,5
1,5	80—120	15—30	5—6	60—80	20—30	6—8
2,5	100—150	10—25	6—7	70—100	15—25	8—9
4,0	160—200	До 10	7—8	110—170	До 10	9—10
Толщина металла, мм	Сварка встык без присадки в среде					
	аргона			гелия		
	I, А	$v_с$, м/ч	Расход газа, л/мин	I, А	$v_с$, м/ч	Расход газа, л/мин
0,4	—	—	—	—	—	—
0,5	—	—	—	—	—	—
1,0	50—80	20—30	4,0	35—60	20—30	5,5
1,5	60—90	20—30	5—6	40—65	20—30	6—8
2,5	90—140	15—20	6—7	60—80	15—20	8—9
4,0	140—200	8—10	7—8	80—140	8—10	9—10

Примечание. Напряжение на дуге 11—15 В при сварке в аргоне, 16—22 В при сварке в гелии. Длину дуги поддерживают 1—3 мм. Диаметр проволоки выбирают в соответствии с толщиной основного металла, а скорость подачи в соответствии с заданным сечением шва.

При равных погонных энергиях и скоростях сварки для тонколистового металла (0,3—0,8 мм) проплавляющая способность импульсной дуги выше проплавляющей способности постоянно горящей дуги. С повышением тока, длительности импульса и жесткости режима глубина проплавления и ширина шва увеличиваются. При сварке импульсной дугой конец вольфрамового электрода затачивают под углом 60—90° по мере оплавления. Техника сварки импульсной дугой не отличается от техники сварки постоянно горящей дугой. Ориентировочные режимы сварки приведены в табл. 11.

Для увеличения проплавляющей способности дуги при аргонодуговой сварке сталей применяют активирующие флюсы (АФ). Применение АФ повышает проплавляющую способность дуги в 1,5—2 раза (рис. 6), что обеспечивает значительный экономический эффект за счет повышения производительности процесса, повышения качества, исключения разделки кромок и многопроходной сварки при толщинах 8—10 мм [11, 14]. Для сварки низколегированных и высокопрочных сталей рекомендуется применять флюс ФС-71, представляющий смесь компонентов (SiO_2, NaF, TiO_2, Ti, Cr_2O_3). Эффективно применять АФ при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом высокопрочных сталей типа 28Х3СНМВФА, подвергнутых электрошлаковому переплаву и требующих для обеспечения заданного

провара увеличения сварочного тока по сравнению с током для сварки металла открытой выплавки. Применение АФ в этом случае позволяет производить сварку без увеличения силы тока; АФ применяют в виде пишущих стержней (карандашей), тонкого порошка или спиртового шликера. Предпочтительным вариантом является применение флюса в виде порошка без какого-либо связующего вещества; АФ наносят на кромки тонким слоем в виде дорожки шириной 8—10 мм и толщиной

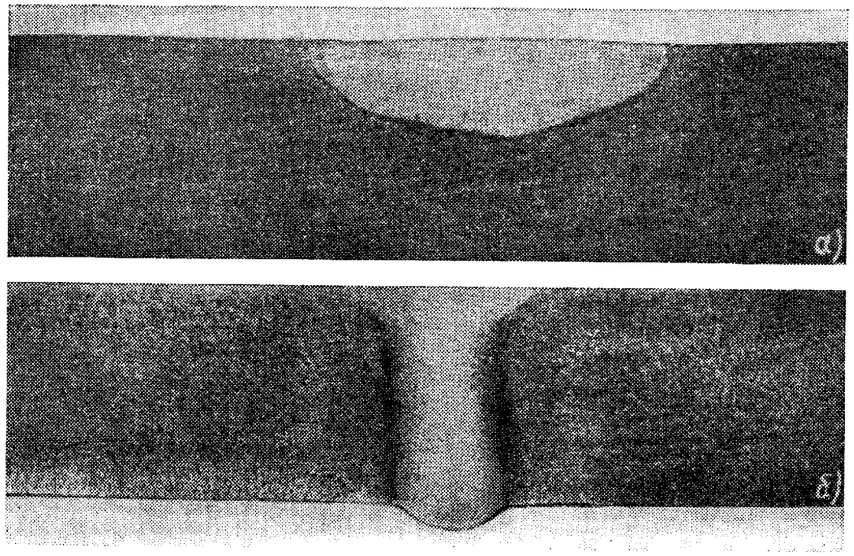


Рис. 6. Влияние АФ на глубину проплавления:
а — без АФ; *б* — с АФ

0,1—0,2 мм. Сварку с АФ рекомендуется применять преимущественно механизированным способом. При ручной сварке затруднено получение равномерной глубины проплавления и возможны контакты конца электрода с расплавом флюса, создающие включение вольфрама в шве. Неплавящийся электрод при сварке с АФ рекомендуется применять из наиболее стойких марок активированного вольфрама ВТ15 или СВИ-1, особенно при выполнении швов большой протяженности. При использовании АФ в виде пишущих стержней поверхность кромок со стороны сварки должна подвергаться пескоструйной или дробеструйной обработке с целью обеспечения адгезии и равномерного распределения АФ. При нанесении АФ в виде тонкого порошка обрабатывать поверхность не требуется. В табл. 12 представлены ориентировочные режимы при сварке с АФ. При сварке с АФ на поверхности шва остается темный налет остатков непрореагировавшего флюса, который следует удалять с помощью металлической щетки или иными средствами.

При использовании АФ в виде спиртового шликера или пишущих стержней могут образовываться поры вследствие попадания частиц флюса в зазор стыка. Для предупреждения этого явления рекомендуется наносить АФ на кромки деталей перед сборкой под сварку или на разведенные кромки стыка, убирая из зазора частицы флюса. Применение АФ не снижает механических свойств сварных соединений и коррозионную стойкость по сравнению со свойствами при сварке без применения АФ.

Режимы сварки плавящимся электродом в среде аргона и углекислого газа представлены в табл. 13—15.

11. Ориентировочные режимы импульсно-дуговой сварки

Толщина металла, мм	Диаметр вольфрамового электрода, мм	I, А	Время, с	
			импульса	паузы
1,0	2,0	120—130	0,1—0,2	0,2—0,3
1,2	2,0—2,5	140—150	0,1—0,2	0,2—0,3

12. Режимы сварки встык неплавящимся электродом в аргоне без АФ и с флюсом

Материал	Толщина металла, мм	$d_э$, мм	I, А		U, В	$v_с$, м/ч	Расход аргона* в горелку, л/мин
			без АФ	с ФС-71			
25ХСНВФА	4	4—5	165—170	135—140	11—12	10	8—12
30ХГСА	5		245—250	185—190			
25ХГСА (обычной выплавки)	6		295—300	205—210	12—13	7	10—12
Стали типа 28Х3СНМВФА (выплавка с применением ЭШП)	4	5	220—230	160—165	11—12	12	8—12
	5		270—280	190—200	12—13	10	10—12
	6		330—340	250—200			

* Расход аргона на поддув 3—5 л/мин.

13. Ориентировочные режимы автоматической сварки плавящимся электродом

Толщина металла, мм	Аргон + 5—10% CO_2				Гелий				$d_э$, мм
	I, А	$v_с$, м/ч	Число слоев	Расход газа, л/мин	I, А	$v_с$, м/ч	Число слоев	Расход газа, л/мин	
Стыковое соединение без разделки									
0,5	40—60	50—70	1	6—8	—	—	—	—	—
0,8	70—90	40—60							
1,0	90—100	35—55							
1,5	110—130	20—40							
2,5	190—270				140—200	20—40	1	8—11	1,6—2,0
3,0	240—330	20—50			190—270				
Стыковое соединение с V-образной разделкой									
4	220—320	20—40	1	7—9	210—270	20—40	1	9—11	2—2,5
6	300—390	15—30	1—2	9—12	240—300	15—30	1—2	11—14	
8	350—430		2	11—15	270—340		2	13—18	2—3
10	360—460			12—17	290—340			15—20	

Примечание. Напряжение на дуге 20—30 В при сварке плавящимся электродом в аргоне с добавками газа, 26—29 В — в гелии.

14. Ориентировочные режимы автоматической сварки конструкционных сталей в среде углекислого газа (при расходе газа 6—10 л/мин)

Соединение	Толщина металла, мм	$d_э$, мм	Режим сварки		
			I, А	$U_д$, В	v, м/ч
Стыковое	0,8	0,5—1,0	40—60	16,5—18,5	40—60
	1,0	0,8—1,0	15—70	17—19	35—55
	1,5	1,0	80—100	20—22	20—40
	2,0	1,6	140—200		
	5,0	2,0	280—340	26—28	15—30
	10,0				25—40
Нахлесточное	1,0	0,6	45—65	18—20	25—45
	1,5		70—90	19—21	20—22
	3,0	1,0	100—120		15—20

Примечание: При толщине металла 10 мм сварку производят в два-три слоя.

15. Ориентировочные режимы полуавтоматической сварки плавящимся электродом в среде углекислого газа

Соединение	Толщина металла, мм	$d_э$, мм	Режимы сварки		
			I, А	$v_д$, В	Расход газа, л/мин
Стыковое	0,8	0,5—0,7	40—60	16,5—18,5	6—8
	1,0		45—55	18—19	
	1,5	0,8—1,0	65—85	19—20	
	2,0	1,0—1,2	110—125	21—23	7—9
	3,0	1,0—1,6	140—170	22—24	8—10
	5,0	1,6—2,0	260—300	26—28	
	10,0		280—300		
Нахлесточное	1,0	0,5—0,8	50—70	18—20	5—7
	1,5	0,8—1,0	80—100	19—21	6—8
	2,0	1,0—1,2	110—130	21—23	7—9
	3,0	1,0—1,6	145—175	22—24	8—10
	1,5—8,0	1,0—1,2	100—120	21—22	7—9
	2,0—8,0	1,0—1,6	110—130	21—23	
Тавровое	1,0	0,5—0,8	35—55	18—19	5—7
	1,5	0,8—1,0	60—80	19—20	6—8
	2,0	1,0—1,2	25—115	21—23	7—9
	3,0	1,0—1,6	140—160	22—24	8—10
	5,0	1,6—2,0	160—200	24—26	

Примечание. При толщине металла 10 мм сварку производят в два слоя.

Для получения качественных сварных соединений конструкционных сталей больших толщин (до 80—100 мм) применяют импульсно-дуговую сварку плавящимся электродом в щелевой зазор между кромками. При этом устанавливают зазор 10—12 мм с помощью соответствующего притупления кромок. Диаметр проволоки 1,6—2,0 мм. При толщине металла более 50—60 мм сварку ведут с двух сторон. Зазор заполняют послойно со скоростью 25—30 м/ч с числом слоев в зависимости от толщины металла. В качестве защитного газа может быть использован аргон или смесь аргона с углекислотой. Многослойная сварка в щелевидную разделку обеспечивает раздробленную структуру металла шва с отсутствием грубых дендритов и малую протяженность зоны термического влияния.

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА

Электронно-лучевую сварку (ЭЛС) выполняют в герметичных камерах с вакуумом 10^{-4}—10^{-5} мм рт. ст. [5]. Высокая концентрация мощности в электронном пучке в сочетании с идеальными защитными свойствами вакуума позволяет получить сварные соединения с узкой зоной термического влияния и малыми деформациями без обогащения металла шва вредными примесями. При сварке деталей из конструкционных сталей обеспечивается большая глубина проплавления (до 30—60 мм) и, следовательно, высокая производительность процесса при изготовлении конструкций из толстолистовых заготовок. ЭЛС применяют для соединений в труднодоступных местах или в случае, когда требуется только присущее электронно-лучевой сварке глубокое и узкое проплавление с минимальными размерами зоны термического влияния и минимальными деформациями.

Легированные высокопрочные стали различных марок при толщине до 25—30 мм можно сваривать электронным лучом за один проход без предварительного подогрева. ЭЛС можно сваривать за один проход стали различной толщины. Типовые режимы ЭЛС конструкционных сталей представлены в табл. 16.

16. Типовые режимы ЭЛС сталей ($U_{уск}$ 25 кВ)

Толщина металла, мм	I, мА	$v_с$, м/ч	$q/v_с$, кал/см
2,2	100	90	240
3,0	140	90	300
4,5	180	90	390
5,0	200	90	430
15,0	240	45	1000
20,0	250	20	2400
30,0	400	20	3900

Для сварки изделий из высокопрочных сталей в зависимости от окончательной термической обработки до или после сварки следует применять различное сварочное оборудование. Для деталей с последующей закалкой и отпуском следует использовать низковольтные установки, обладающие ускоряющим напряжением 15—30 кВ и поверхностной плотностью теплового потока 10^3—10^6 Вт/см^2, и выходную мощность до 6 кВт. Для деталей из предварительно закаленных элементов без последующей термической обработки следует применять высоковольтные установки с ускоряющим напряжением 100—150 кВ, имеющие поверхностную плотность теплового потока 10^7—10^9 Вт/см^2 и выходную мощность до 3 кВт [5, 13, 14].

Швы, сваренные при большой скорости с применением высоковольтных источников, в закаленном состоянии имеют зону разупрочнения 0,2—0,5 мм, что не снижает прочность сварного соединения. В этом случае мягкая отожженная зона как бы «поддерживается» более прочным основным металлом и прочной зоной металла шва, из-за чего разрушение происходит по основному неразупрочненному металлу.

Режимы и погонная энергия сварки, прочность и степень разупрочнения сварных соединений стали 42Х2ГСНМА ($\sigma_в \approx 200$ кгс/мм^2; $\delta = 4{,}5$ мм) приведены в табл. 17.

17. Режимы сварки, прочность и степень разупрочнения сварных соединений стали 42Х2ГСНМА (после низкого отпуска)

Вид сварки	I, А	U, В	$v_с$, м/ч	$q/v_с$, кал/см	$\sigma_в$, кгс/мм²	Степень разупрочнения, %
Аргонодуговая однопроходная	240	27	55	611	160	22
Электронно-лучевая	0,18	24 000	90	373	192	6

Рекомендуется стыковое соединение на подкладке из того же материала с последующим удалением ее механическим способом. Толщина подкладки должна быть не менее $^1/_5$ толщины свариваемого материала при ширине 15 мм; допускается использование многослойной подкладки с толщиной каждого слоя 1,5—2,0 мм. Возможна также стыковая сварка на весу.

Свариваемые кромки необходимо подвергать механической обработке под углом 90°, заусенцы удалять без скругления кромок. Поверхность свариваемых кромок должна быть зачищена стальной щеткой с двух сторон до металлического блеска на расстоянии 10—20 мм от стыка. Очистка абразивным кругом или наждачной шкуркой нежелательна. Перед сборкой свариваемые кромки, подкладную планку, разжимные кольца или поверхность прижимов нужно обезжирить бензином или ацетоном. Сборку заготовок под сварку рекомендуется производить с помощью зажимных приспособлений, обеспечивающих плотный и равномерный прижим заготовок по всей длине свариваемых кромок. Допустимые зазоры и депланация кромок приведены в табл. 18.

18. Допустимые зазоры и депланация кромок при ЭЛС

Толщина основного металла, мм	Зазор в стыке	Смещение по высоте
	не более, мм	
1,0—1,5	0,1	0,1
2,0—3,0	0,15	0,2
Св. 3,0	0,2	0,2

Свариваемые заготовки и приспособления (кондукторы, зажимные устройства) до сварки подвергают размагничиванию для избежания смещения луча от центра шва.

Необходимо предусматривать припуск (0,8—1,0 мм) по толщине свариваемых кромок на обработку лицевой и корневой поверхности шва для ликвидации возможных подрезов и неравномерных проплавов. Если конструкция сварного соединения исключает доступ для обработки поверхности корня шва, необходимо предусмотреть выступ типа остающейся подкладки (при замковом соединении), который будет предотвращать проплавление шва и разбрызгивание металла. Стали 30Х2ГСНВМ и 42Х2ГСНМ рекомендуется сваривать ЭЛС на установке ЭЛУ-4 при ускоряющем напряжении 60 кВ и скорости сварки 70 м/ч; ток эмиссии зависит от толщины кромок:

Толщина кромок, мм	1,5	2	3	4
Ток эмиссии, мА	17	23	28	32

Соединения из стали 42Х2ГСНМ толщиной 2—4 мм, выполненные ЭЛС и подвергнутые термической обработке (закалке и низкому отпуску), при одинаковой прочности имеют более высокие пластические свойства по сравнению с соединениями, полученными аргонодуговой сваркой; соответственно $a_{ту}$* = 1,8 кгс·м/см², угол загиба 52—64° и $a_{ту} = 0{,}8 \div 1{,}4$ кгс·м/см², угол загиба 30—35°.

ЭЛС термически упрочненной стали 42Х2ГСНМ обеспечивает прочность соединений не менее 90% прочности основного металла, а местный кратковременный высокотемпературный нагрев сварного соединения расфокусированным лучом увеличивает угол загиба сварного шва на 20—30%.

* $a_{ту}$ — ударная вязкость образца с концентратором в виде усталостной трещины.

При ЭЛС высокопрочной стали 42Х2ГСНМ ($\delta = 2$ мм) остаточные напряжения по абсолютной величине не превышают 8 кгс/мм², вследствие чего они не могут вызвать заметных деформаций или замедленного разрушения конструкции.

К трудностям ЭЛС среднелегированных сталей средних и больших толщин относится их чувствительность к повышенному содержанию в основном металле углерода, легирующих элементов и газов, в частности кислорода. Например, при сварке сталей толщиной более 30 мм с содержанием более 0,2% С в швах возникают кристаллизационные трещины. Если содержание кислорода в стали превышает 0,02%, ЭЛС становится невозможной из-за повышенного разбрызгивания жидкого металла и образования пор в шве.

При ЭЛС толстолистовых изделий (более 20 мм) из конструкционных сталей при неоптимальных режимах и технологии сварки наблюдаются дефекты, не встречающиеся при дуговой сварке: пустоты в корне шва (холодные затворы), полости большой протяженности в литом металле (паровые мешки) и узкие щели вдоль оси шва (горячие трещины) [9]. Для устранения дефекта в корне шва рекомендуется уменьшать концентрацию мощности в электронном пучке, например путем его расфокусировки до определенных пределов ($\varepsilon \leqslant 10^5$ Вт/см²). Однако при этом увеличивается ширина и уменьшается глубина шва, что не всегда желательно. Более эффективно вывести дефект в корне шва в подкладку с последующим ее удалением. Дефекты в виде полостей в металле шва устраняют при скорости сварки ниже некоторого предела. Например, при сварке низкоуглеродистых сталей толщиной до 40 мм электронным пучком мощностью 15 кВт паровые мешки исчезают при уменьшении скорости сварки ниже 25 м/ч.

Вероятность образования горячих трещин уменьшается при улучшении условий подпитки жидким металлом в процессе усадки ванны при ее кристаллизации. Этому способствует клинообразная форма шва с расширением вверху и увеличение радиуса кривизны фронта кристаллизации в хвостовой части ванны. Подобный шов образуется при фокусировке пучка у нижней поверхности свариваемых листов или еще ниже, а хвостовая часть ванны становится более округлой при замедлении процесса сварки (до 10 м/ч при толщине металла 70 мм) [7].

ТОЧЕЧНАЯ И РОЛИКОВАЯ СВАРКА

Точечной и роликовой сваркой можно соединять детали и узлы из низколегированных и среднеуглеродистых сталей типа 30ХГСА, 12Г2А, 23Х2НВФА и 45. Сваривают листы, профили и детали, изготовленные резанием, толщиной $0{,}3 + 0{,}3 \div 3 + 3$ мм.

Для сталей 30ХГСНА, 30Х2ГСНВМ, 42Х2ГСНМА, 28Х3СНМВФА, 42Х2ГСНМ и близких им по составу точечную и роликовую сварку не применяют.

Соотношение толщин свариваемых деталей должно быть не выше 2 : 1; 3 : 1. При бо́льших соотношениях толщин не обеспечивается надежность и стабильность размера ядра и механических свойств сварных соединений. Роликовую сварку деталей толщиной свыше 1,5 мм рекомендуется производить с прерывистым (шаговым) вращением роликов.

Детали следует соединять не менее чем в двух точках. Детали, предназначенные для сварки, должны быть очищены от жира, масел, окислов и других загрязнений на ширину, соответствующую размеру нахлестки. При сборке не разрешается грубая подгонка деталей с образованием хлопунов и больших зазоров. Ориентировочные режимы точечной и роликовой сварки указаны в табл. 19 и 20.

При сварке закаленных сталей рекомендуется использовать плавное нарастание тока в первом импульсе или перед первым сварочным импульсом производить подогрев дополнительным импульсом тока. Усилие сжатия электродов следует увеличить на 15—20%, а длительность первого импульса до 30—40%. Допускается применять один сварочный импульс, если узел подвергают после сварки термической обработке.

19. Ориентировочные режимы точечной сварки сталей 30ХГСА, 12Г2А, 23Х2НВФА и 45

Толщина тонкой детали, мм	Первый импульс (сварка)		Длительность паузы, с	Второй импульс (термическая обработка)		Усилие электродов, кгс
	Ток, тыс.А	Длительность импульса, с		Ток, тыс.А	Длительность импульса, с	
0,5	5,0—6,0	0,32—0,40	0,3—0,5	4,0—5,0	0,5—0,6	200—300
0,8	5,5—6,2	0,36—0,44	0,4—0,6	4,5—5,2	0,6—0,74	250—350
1,0	6,2—6,7	0,42—0,50	0,6—0,7	4,8—5,5	0,68—0,78	400—500
1,2	7,2—7,7	0,46—0,54	0,7—0,9	5,0—6,0	0,72—0,86	500—600
1,5	8,7—9,2	0,56—0,64	0,8—1,1	6,2—7,4	0,86—0,96	600—800
2,0	10,0—11,0	0,74—0,84	1,0—1,4	7,0—8,0	1,1—1,3	600—1000
2,5	11,5—12,5	1,0—1,1	1,1—1,5	8,0—9,0	1,3—1,9	1000—1200
3,0	13,0—14,0	1,2—1,4	1,3—1,6	9,0—10,0	1,8—2,2	1100—1400

20. Ориентировочные режимы роликовой сварки сталей 30ХГСА, 12Г2А, 23Х2НВФА и 45

Толщина тонкой детали, мм	Ток, тыс. А	Длительность, с		Усилие роликов, кгс	v_c, м/мин
		импульса	паузы		
0,5	6,0—8,0	0,11—0,12	0,12—0,16	300—350	0,8—0,9
0,8	7,5—8,5	0,12—0,14	0,14—0,20	350—400	0,7—0,8
1,0	9,5—10,5	0,14—0,16	0,18—0,24	500—600	0,6—0,7
1,2	12,0—13,5	0,16—0,18	0,22—0,30	550—650	0,5—0,6
1,5	14,0—16,0	0,18—0,20	0,26—0,32	800—900	0,5—0,6
2,0	17,0—19,0	0,20—0,22	0,30—0,36	1000—1150	0,5—0,6
2,5	20—21,0	0,24—0,26	0,32—0,40	1200—1400	0,4—0,5
3,0	22,0—23,0	0,30—0,32	0,36—0,44	1400—1600	0,3—0,4

При роликовой сварке закаливающихся сталей наружное охлаждение не допускается. Сварку рекомендуется производить за один проход. В случае обрыва шва сварку следует начинать за пять-десять точек раньше места обрыва. Замыкание кольцевых и круговых швов производят с перекрытием не менее чем пятью точками. Продольные и поперечные роликовые швы в местах их пересечения для обеспечения герметичности рекомендуется повторно сваривать на точечных или роликовых машинах; при этом сварочный ток должен быть увеличен на 20—25% по сравнению с номинальным.

Повторную сварку производят по любому из пересекающихся швов на длине не менее десяти точек. Уступ нахлестки в месте пересечения должен быть выполнен на «ус».

ГАЗОВАЯ И АТОМНО-ВОДОРОДНАЯ СВАРКА

Газовую и атомно-водородную сварку применяют преимущественно при сварке трубчатых тонкостенных конструкций, при приварке косынок и других деталей короткими угловыми швами и т. п. Качество сварных соединений, выполненных газовой и атомно-водородной сваркой, уступает качеству соединений при других методах сварки, например аргонодуговой. Применять газовую и атомно-водородную сварку для высокопрочных сталей 30ХГСНА, 28Х3СНМВФА, 30Х2ГСНВМ и др. не рекомендуется.

Марки присадочной проволоки и механические свойства сварных соединений приведены в табл. 21.

21. Присадочная проволока и механические свойства при газовой и атомно-водородной сварке

Марка стали	Термическая обработка	Присадочная проволока		$\sigma_в$, кгс/мм²	$a_н$, кгс·м/см²
		Марка	ГОСТ		
45	Без термической обработки при закалке и отпуске после сварки	Св-08А; Св-08ГА; Св-08ГС; Св-12ГС	ГОСТ 2246—70	$0{,}8\,\sigma_в$ основного металла	—
10Г2А 12Г2А	Без термической обработки или с нормализацией до или после сварки	Св-08А; Св-08ГА; Св-18ХМА	ГОСТ 1146-70	$0{,}8\,\sigma_в$ основного металла	6
25ХГСА 30ХГСА	Закалка и отпуск после сварки на $\sigma_в$, кгс/мм²: ⩽90 ⩾90	Св-08А; Св-18ХМА	ГОСТ 2246—70	$0{,}8\,\sigma_в$ основного металла	8 при атомно-водородной сварке; 6 при газовой сварке
					7 при атомно-водородной сварке; 4 при газовой сварке
	Закалка и отпуск до сварки (сварка в термически обработанном состоянии)	Св-10Х16Н25АМ6		60	8
12Х2НВФА 25Х2НВФА	Без последующей термической обработки (сварка в закаленном состоянии)	Св-18ХМА; Св-10Х16Н25АМ6		90 105 60	6 4 10
12Х2НВФА 25Х2НВФА	Закалка и отпуск после сварки для сталей 12Х2НВФА на $\sigma_в \geqslant 100$ кгс/мм², для сталей 25Х2НВФА на $\sigma_в \geqslant 115$ кгс/мм²	Св-18ХМА		$0{,}9\,\sigma_в$ основного металла	6 4

Список литературы

1. **Каховский Н. И., Фартушный В. Г., Ющенко К. А.** Электродуговая сварка сталей. Справочник. Киев, «Наукова думка», 1975. 480 с.
2. **Кулябцев П. И.** Остаточные сварочные напряжения и прочность соединений. М., «Машиностроение», 1964, 382 с.
3. **Лахтин Ю. М.** Металловедение и термическая обработка. М., «Металлургия», 1976. 406 с.
4. **Макара А. М., Малевский Ю. Б.** Особенности распада переохлажденного аустенита стали 30ХГСА при термическом цикле околошовной зоны. — «Автоматическая сварка», 1954, № 6 (39), с. 3—18.
5. **Назаренко О. К., Истомин Е. И., Локшин В. Е.** Электронно-лучевая сварка. М., «Машиностроение», 1966. 127 с.
6. **Нехендзи Ю. А.** Стальное литье. М., Металлургиздат, 1948. 766 с.
7. **Патон Б. Е., Песков Г. И., Живаго Л. И.** Специфика образования шва при электронно-лучевой сварке. — «Автоматическая сварка», 1976, № 3, с. 1—5.
8. **Просвирин В. И., Эпштин С. Д.** Изотермическое образование мартенсита. М., Машгиз, 1953. 100 с.
9. **Раймонд Э. Д., Шиганов Н. В.** Влияние влажности аргона на образование трещин. — «Сварочное производство», 1972, № 10, с. 28—29.
10. **Раймонд Э. Д., Шиганов Н. Б.** Работоспособность тонкостенных сварных сосудов из высокопрочной стали с кольцевыми участками меньшей прочности. — «Сварочное производство», 1967, № 9, с. 9—11.
11. **Раймонд Э. Д., Нефедов В. П., Шиганов Н. В.** Сварка высокопрочной стали с применением порошкообразных активирующих флюсов. — «Сварочное производство», 1973, № 6, с. 18—19.
12. **Сварка** тонколистовой высокопрочной стали в потолочном положении. — «Сварочное производство», 1969, № 5, с. 21—23. Авт.: Э. Д. Раймонд, Н. В. Шиганов. В. Н. Крюковский и др.
13. **Справочник** по сварке. Т. 4. М., «Машиностроение», 1971. 415 с. Авт.: А. И. Акулов, В. В. Баженов, Г. А. Бельчук и др.
14. **Технология** электрической сварки металлов и сплавов плавлением. М., «Машиностроение», 1974. 767 с. Авт.: Б. Е. Патон, Г. И. Лесков, Г. З. Болошкевич и др.
15. **Федоров В. Г., Шуваева Н. А.** Влияние содержания углерода и водорода в сварных соединениях сталей на сопротивляемость образованию холодных трещин. — «Сварочное производство», 1976, № 3. с. 22—23.
16. **Фролов В. В.** Поведение водорода при сварке плавлением. М., «Машиностроение», 1966. 154 с.
17. **Электроды** для дуговой сварки и наплавки. Каталог. Киев, «Наукова думка», 1967. 440 с.

Глава 7
СВАРКА ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СВАРИВАЕМОСТИ

Теплоустойчивыми называют стали, предназначенные для длительной работы при температуре до 600° С. Эти стали используют при изготовлении энергетических и нефтехимических установок. В соответствии с условиями длительной работы под напряжением при высоких температурах теплоустойчивые стали должны обладать сопротивлением ползучести, длительной прочностью, стабильностью свойств во времени и жаростойкостью. Перечисленные свойства в условиях экономичного легирования достигаются применением хромомолибденовых и хромомолибденованадиевых сталей перлитного класса. Хромомолибденовые стали 12МХ, 15ХМ, 20ХМЛ и 15Х5М с ферритно-перлитной структурой используют для работы при 500—550° С, а хромомолибденованадиевые стали 12Х1МФ, 15Х1М1Ф, 20ХМФЛ, 15Х1М1ФЛ и 12Х2МФСР — для работы при 550—580° С. Более высокие жаропрочные свойства хромомолибденованадиевых сталей обусловлены не только стабилизацией карбидной фазы ванадием, но и применением упрочняющей термической обработки на бейнитную структуру.

Сварка теплоустойчивых сталей сопровождается изменением свойств свариваемого металла, связанным с его расплавлением и кристаллизацией при образовании шва, а также структурными изменениями и упругопластическими деформациями в околошовной зоне. Это обусловливает физико-химическую неоднородность сварных соединений и образование местного сложнонапряженного состояния, что в некоторых случаях ухудшает работоспособность и уменьшает эксплуатационную надежность конструкций.

Металлургическая свариваемость теплоустойчивых сталей, определяемая отношением металла к плавлению, металлургической обработке и последующей кристаллизации шва, не вызывает существенных осложнений. Технология сварки и сварочные материалы на современном уровне обеспечивают необходимую стойкость металла швов против образования горячих трещин и высокие характеристики их работоспособности, отвечающие требованиям, предъявляемым к основному металлу. Тепловая же свариваемость осложняется охрупчиванием металла в результате образования метастабильных структур в участках околошовной зоны, нагретых выше температуры Ac_3, и разупрочнением в участках, нагретых в интервале температура Ac_3 — температура отпуска стали. Образование хрупких структурных составляющих (троостита, мартенсита), а также суммирование напряжений, вызванных неравномерным нагревом и структурными превращениями, могут исчерпать пластичность металла и вызвать разрушение конструкции в период ее изготовления. Для предотвращения образования холодных трещин необходимо использовать сопутствующий сварке нагрев, а иногда и выдержку сварных соединений при определенной температуре после окончания сварки.

Эксплуатационная надежность конструкций из металла повышенной толщины может быть обеспечена лишь после стабилизации структуры и снятия напряжений путем отпуска сварных соединений. При этом температура отпуска сварных соединений хромомолибденованадиевых сталей должна быть не ниже 700° С, так как выпадение дисперсных карбидов ванадия из твердого раствора при низких температурах отпуска приводит к охрупчиванию металла околошовной зоны и возникновению локальных разрушений сварных соединений при отпуске или в процессе эксплуатации конструкций.

Разупрочнение металла в околошовной зоне приводит к снижению длительной прочности сварных соединений. Это наиболее характерно выражено при сварке хромомолибденованадиевых сталей, упрочняемых термической обработкой. Мягкая прослойка в сварных соединениях может явиться причиной локальных разрушений жестких сварных соединений в процессе эксплуатации, особенно при изгибающих нагрузках. Разупрочнение металла околошовной зоны устраняется перекристаллизацией в процессе высокотемпературной термической обработки (нормализации с отпуском). Однако при этом возникает необходимость повышения содержания углерода и уровня легирования швов для улучшения их термической прорабатываемости при охлаждении с температур нормализации, так как при низком содержании углерода (0,06—0,12 %) швы после высокотемпературной термической обработки не обеспечивают необходимой длительной прочности.

В условиях дуговой сварки повышение содержания углерода и уровня легирования швов достигается применением специальных сварочных материалов. При электрошлаковой сварке благодаря большой доле участия основного металла в формировании шва можно использовать сварочные проволоки с низким содержанием углерода.

Высокотемпературная термическая обработка сварных соединений не может быть подобно отпуску осуществлена местно, так как это приводит к разупрочнению близлежащих участков металла, а объемная термическая обработка сварных конструкций ограничивается габаритными размерами печей.

ДУГОВАЯ СВАРКА

Подогрев перед сваркой. Сопутствующий сварке местный или общий нагрев изделия является надежным средством предотвращения холодных трещин, так как уменьшает разницу температур металла в зоне сварки и на периферийных участках, что снижает напряжения первого рода, вследствие чего пики этих напряжений в околошовных участках металла сглаживаются. Подогрев также уменьшает скорость охлаждения металла, что предотвращает превращение аустенита в мартенсит, которое сопровождается резким увеличением удельного объема металла, вызывающим появление напряжений второго рода. Повышение температуры металла при любом структурном состоянии увеличивает его пластичность, а следовательно, и деформационную способность. Повышение пластичности сварного соединения имеет такое же важное значение для предотвращения образования холодных трещин, как и снижение напряжений, поскольку трещины образуются в результате исчерпания деформационной способности металла под действием напряжений.

При сварке теплоустойчивых сталей необходимо ограничивать не только нижний, но и верхний предел температур подогрева. Излишне высокие температуры подогрева приводят к распаду аустенита в высокотемпературной области с образованием грубой ферритно-перлитной структуры, не обеспечивающей необходимую длительную прочность и ударную вязкость сварных соединений. Рекомендуемые пределы изменения температур предварительного и сопутствующего подогрева различных сталей в зависимости от толщины свариваемых изделий приведены в табл. 1.

Поскольку перераспределение напряжений и структурные превращения могут происходить и после окончания сварки, в некоторых случаях необходимы дополнительные меры, предотвращающие образование холодных трещин в сварных соединениях, не подвергнутых термической обработке. К ним, например, относится выдержка сварных соединений после окончания сварки при 150—200° С в течение нескольких часов для завершения превращений остаточного аустенита и эвакуации водорода.

Приведенные рекомендации не относятся к исправлению несквозных дефектов в отливках высоконикелевыми аустенитными электродами ЦТ-36 и АНЖР-3. В этом случае подогрев заваривасмых изделий можно не применять.

1. Температура предварительного и сопутствующего подогрева, °С

Марка стали	Толщина свариваемых изделий, мм		Марка стали	Толщина свариваемых изделий, мм	
	7—30	Св. 30		7—30	Св. 30
12МХ	—	150—200	15Х1М1Ф	300—350	
15ХМ	150—200	200—250	20ХМФ-Л	350—400 (для всех толщин)	
20ХМ-Л	200—250	250—300	15Х1М1Ф-Л		
12Х1МФ	250—300	300—350	Х5МФ	350—400 (для толщин до 30 мм)	400—450

Сварочные материалы. При разработке покрытых электродов, сварочной проволоки и флюсов для сварки теплоустойчивых сталей стремятся приблизить химический состав металла шва к химическому составу основного металла, так как в условиях длительной работы сварных соединений при высоких температурах существует опасность развития диффузионных процессов.

Диффузионные процессы и особенно миграция углерода в зоне сплавления снижают длительную прочность и пластичность сварных соединений. Это явление наблюдается даже при небольшом различии в легировании металла шва карбидообразующими элементами (например, сталь 12Х1МФ — шов 10Х3М1БФ). В связи с этим сварочные материалы выбирают в соответствии с маркой свариваемой стали, а также видом последующей термической обработки сварных соединений.

Для ручной дуговой сварки теплоустойчивых сталей в большинстве случаев используют электроды с основным (фтористо-кальциевым) покрытием, содержащим карбонат кальция (мрамор) и флюорит (плавиковый шпат). Электроды с покрытием этого типа обеспечивают повышенную раскисленность металла шва при малом солержании неметаллических включений и водорода, вследствие чего достигается высокая пластичность и ударная вязкость швов. Однако для электродов с покрытием этого типа с целью предотвращения образования пор в швах требуются сушка при 80—100° С перед их использованием, сварка при возможно короткой дуге и тщательная зачистка кромок от ржавчины и окалины. Электроды малого диаметра наиболее склонны к образованию пор, вызванных азотом. В связи с этим для сварки труб поверхностей нагрева котлов рекомендуются электроды марок ЦЛ-38, ЦЛ-39 и ЦЛ-40 диаметром 2,5 мм с повышенной надежностью защиты плавящегося металла.

Для автоматической сварки в сочетании с легированными проволоками применяют низкоактивные флюсы АН-22, ФЦ-11, ЗИО-Ф2 с пониженным содержанием окислов марганца и кремния. Это обеспечивает высокие пластические свойства швов и стабильность состава многослойных швов по содержанию в них марганца и кремния. Для полуавтоматической сварки в среде углекислого газа используют проволоки, содержащие наряду с основными легирующими элементами повышенное количество кремния и марганца. При аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом в качестве присадочного материала применяют проволоку тех же марок, что и при сварке под флюсом. Рекомендации по применению сварочных материалов даны в табл. 2.

Ручную дуговую сварку покрытыми электродами используют при монтаже котлов и паропроводов, а в заводских условиях — при изготовлении тройников, сварке блоков трубопроводов и приварке труб поверхностей нагрева к коллекторам, а также при сварке литых деталей турбин и заварке дефектов в отливках. Автоматическую сварку под флюсом применяют при сварке паропроводов и приварке донышек к коллекторам в заводских условиях. Аргонодуговую сварку

2. Сварочные материалы*[1]

Марка стали	Термическая обработка	Электроды для ручной дуговой сварки	Флюсы и проволока для автоматической сварки	Проволока для полуавтоматической сварки в среде CO_2	Присадочная проволока для аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом
12МХ	Отпуск	Тип Э-09МХ, марка ЦУ-2МХ	АН-22, ФЦ-11, ЗИО-Ф2, Св-08МХ	—	Св-08МХ
15ХМ 20ХМЛ		Тип Э-09Х1М, марки ЦУ-2ХМ, ЦЛ-38, ЗИО-26, УОНИ-13ХМ	АН-22, ФЦ-11, ЗИО-Ф2, Св-08ХМ	Св08ХГСМА	Св-08ХМ или Св-08ХГСМА
12Х1МФ 15Х1М1Ф 20ХМФ-Л 15Х1М1Ф-Л		Тип Э-09Х1МФ, марки ЦЛ-20, ЦЛ-45, ЦЛ-39	АН-22, ЗИО-Ф2 Св-08ХМФА	Св-08ХГСМФА	Св-08ХМФА или Св-08ХГСМФА
	Нормализация с отпуском	Марка ЦЛ-47*[2] или тип Э-10Х1М1НФБ, марка ЦЛ-36	АН-22 Св-14Х1М1ФА*[3]	—	Св-14Х1М1ФА*[3]
12Х2МФСР 15Х2МФБ	Отпуск	Тип Э-10Х3М1БФ, марка ЦЛ-40	—	—	Св-08ХМФА или Св-08ХГСМФА
12Х5МФ		Тип Э-10Х5МФ, марка ЦЛ-17	—	—	—

*[1] Указанные в таблице типы электродов отвечают требованиям ГОСТ 9467—75, флюс АН-22 — ГОСТ 9087—69, сварочная проволока — ГОСТ 2246—70.
*[2] Электроды изготовляют по ТУ ЦНИИТМАШ.
*[3] Проволоку изготовляют по ТУ 14-130-28—72.

вольфрамовым электродом применяют как в заводских, так и в монтажных условиях при сварке корневых слоев кольцевых швов труб поверхностей нагрева котлов и паропроводов, когда сварку осуществляют без подкладных колец.

Термическая обработка сварных соединений. Сварные соединения теплоустойчивых сталей, работающие в условиях ползучести, без термической обработки после сварки не обеспечивают эксплуатационной надежности ввиду структурной неоднородности и наличия остаточных сварочных напряжений. Поэтому большинство сварных конструкций из теплоустойчивых сталей подвергают термической обработке. Исключение составляют сварные соединения из хромомолибденовых сталей (12МХ, 15ХМ, 20ХМЛ) при толщине менее 10 мм и из хромомолибденованадиевых сталей (12Х1МФ, 15Х1М1Ф, 12Х2МФСР) при толщине менее 6 мм, а также литые детали с несквозными дефектами, заваренные высоконикелевыми электродами ЦТ-36 и АНЖР-3.

При изготовлении конструкций из теплоустойчивых сталей используют обычно отпуск. Его преимущество заключается в том, что он может быть использован в качестве местной термической обработки. Отпуск позволяет также применять сварочные материалы с низким содержанием углерода, что обеспечивает повышенную технологическую прочность сварных соединений. Отпуск стабилизирует структуру (твердость) сварного соединения и снижает остаточные напряжения. С увеличением содержания хрома, молибдена, ванадия и других элементов, повышающих релаксационную стойкость сталей, температура отпуска и время выдержки должны увеличиваться. Особую опасность представляет недостаточный отпуск сварных соединений хромомолибденованадиевых сталей в связи с возможностью дисперсионного твердения, вызванного выпадением в околошовной зоне карбидов ванадия. Недостатком отпуска является невозможность полного выравнивания структуры, в частности устранения разупрочненной мягкой прослойки в зоне термического влияния сварки.

3. Режимы термической обработки * сварных соединений

Марка сталн	Температура	Время выдержки при отпуске в часах для толщин, мм		
		До 20	20—45	Св. 45
12МХ	О.670 ± 10° С	1	2	3
15ХМ, 20ХМЛ	О.700 ± 10° С	1	2	3
12Х1МФ, 20ХМФЛ, 15Х1М1Ф, 15Х1М1ФЛ, 12Х2МФСР	О.740 ± 10° С	2	3	5
12Х1МФ, 20ХМФЛ, 15Х1М1Ф, 15Х1М1ФЛ	Н.980 ± 10° С, О.740 ± 10° С	5	7	10
12Х5МФ	О.760 ± 10° С	2	3	5

* Условные обозначения: О—отпуск; Н—нормализация.

4. Свойства сварных соединений теплоустойчивых сталей [1, 5, 7, 8]

Марка стали	Вид сварки и термическая обработка	Механические свойства при 20° С					Предел длительной прочности за 100 тыс. ч, кгс/мм²	
		$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ_5	ψ	$a_н$, кгс·м/см²	стали	сварного соединения
		кгс/мм²		%				
15ХМ	Ручная электродами ЦУ-2ХМ Отпуск	45—50	22—30	15—22	30—55	14—20	27 при 450° С 6,5 при 550° С	27 при 450° С 6,0 при 550° С
20ХМЛ	Полуавтоматическая в среде CO_2 проволокой Св-08ХГСМА Отпуск	42—45	24—28	20—22	55—60	14—20	28 при 475° С 6 при 550° С	23 при 475° С 6 при 550° С
12Х1МФ	Ручная электродами ЦЛ-20 Отпуск	50—58	35—45	15—18	70—75	13—15	8,5 при 565° С	6,5 при 565° С
15Х1М1Ф	То же	50—58	35—45	15—18	72—75	14—16	9 при 565° С	7,5 при 565° С
	Ручная электродами ЦЛ-47, нормализация с отпуском	52—58*	35—40*	22—26*	68—72*	10—14*		9 при 565° С
	Автоматическая под флюсом АН-22 проволокой Св-08ХМФА Отпуск	45—50*	30—32*	22—26*	70—76*	16—20*		8 при 565° С
	Автоматическая под флюсом АН-22 проволокой Св-14Х1М1ФА Нормализация с отпуском	58—62*	36—40*	20—24*	70—74*	10—14*		9 при 565° С

* Свойства металла шва.

Применение высокотемпературной термической обработки — нормализации с последующим отпуском позволяет путем перекристаллизации ликвидировать разупрочнение и обеспечить более высокую эксплуатационную надежность сварных соединений. Однако применение нормализации требует специальных приспособлений, обеспечивающих более высокую термическую прорабатываемость швов, близкую к прорабатываемости сварной стали. Кроме того, при нормализации необходимо применять общую термическую обработку всей сварной конструкции, так как местный высокотемпературный нагрев сварного соединения под нормализацию вызывает разупрочнение металла в зонах, расположенных вблизи индуктора или другого нагревательного устройства, что снижает сопротивление ползучести и длительную прочность. Рекомендуемые режимы термической обработки сварных соединений приведены в табл. 3.

Свойства сварных соединений. Разупрочнение теплоустойчивых сталей в околошовной зоне, происходящее под действием термического цикла сварки в результате дополнительного высокотемпературного отпуска и неполной перекристаллизации, проявляется в первую очередь в условиях длительной работы при высоких температурах. Снижение длительной прочности сварных соединений по сравнению с прочностью основного металла зависит от характера термического цикла сварки, степени упрочнения сталей термической обработкой и структурной стабильности стали.

Длительные прочности основного металла и сварных соединений хромомолибденовой стали 20ХМЛ примерно одинаковы (табл. 4). Это объясняется тем, что вследствие малой прокаливаемости и нерегламентируемой скорости охлаждения при нормализации стали этой группы упрочняются в процессе термической обработки незначительно, а следовательно, и мало склонны к разупрочнению при сварке.

Хромомолибденованадиевые стали разупрочняются при сварке в большей степени, так как стали 20ХМФЛ, 15Х1М1Ф охлаждаются при нормализации принудительно со скоростью 1000° С/ч, а трубы из стали 12Х1МФ проходят закалку. Если коэффициент теплоустойчивости сварных соединений (т. е. отношение длительной прочности сварного соединения к длительной прочности основного металла) для нормализованной и отпущенной стали 15Х1М1Ф при ручной и автоматической сварке равен 0,8—0,9, то для закаленной и отпущенной стали 12Х1МФ (толстостенные паропроводные трубы) он равен 0,7. После нормализации с отпуском длительная прочность сварных соединений может достичь длительной прочности основного металла.

КОНТАКТНАЯ СВАРКА

Контактная стыковая сварка непрерывным оплавлением является основным технологическим процессом при изготовлении элементов поверхностей нагрева котлов. Сварку осуществляют на автоматизированных машинах ЦСТ-200 и ЦСТ-200М [3]. Привод механизма оплавления и осадки у машин разъемный. При оплавлении передвижение подвижной плиты машины осуществляется кулачковым механизмом с электроприводом постоянного тока, что обеспечивает плавное регулирование скорости оплавления. Программа, задаваемая кулачком, построена таким образом, что скорость оплавления непосредственно перед осадкой резко возрастает. Это способствует повышению качества сварных соединений. Машина ЦСТ-200М позволяет, кроме того, осуществлять сварку с подогревом, что используется при изготовлении поверхностей нагрева из сталей 12Х2МФСР и 12Х2МФБ (ЭИ351).

Необходимое качество сварки труб достигается при выполнении следующих рекомендаций. Установочная длина каждой трубы должна составлять 0,8—1,0 наружного диаметра трубы, но не менее 30 мм. Сварку необходимо производить при минимально возможном вторичном напряжении (5,5—6,5 В), исключающем

возникновение коротких замыканий при оплавлении. Припуск на оплавление выбирают в зависимости от толщины стенки трубы:

δ, мм	3	4	5	7
Припуск, мм	8	12	14	19

Длительность оплавления принимают из расчета обеспечения средней скорости оплавления 0,75—1,25 мм/с. Конечная скорость оплавления должна возрастать для перлитных сталей в 3—4 раза по сравнению со средней, а для труб из высоколегированных сталей в 5—6 раз. Общий припуск на осадку должен составлять (1,0—1,5) δ, а припуск на осадку под током — 0,5—0,8 общего припуска на осадку. Скорость осадки рекомендуется для труб из стали 12Х1МФ и 15Х1М1Ф не менее 30 мм/с, а для труб из сталей 12Х2МФСР и 12Х2МФБ не менее 60 мм/с.

Для уменьшения внутреннего грата в некоторых случаях во время сварки продувают трубы азотом или азотно-водородной смесью под избыточным давлением около 1 кгс/см². При этом в связи с охлаждающим действием газа на зону стыка режимы сварки труб поверхностей нагрева следует корректировать с увеличением времени сварки и припуска на оплавление [4].

Стыки труб из сталей 12Х1МФ и 15Х1М1Ф мало восприимчивы к закалке и термической обработке после сварки их можно не подвергать [2]. Кратковременному отпуску следует подвергать стыки труб из сталей 12Х2МФБ (750 ± 10° С в течение 10—20 мин).

Список литературы

1. **Баженов В. В.** Дуговая сварка теплоустойчивых сталей. М., «Машиностроение», 1967. 35 с.

2. **Гельман А. С.** Исследование стыковой сварки оплавлением труб из перлитных и полуферритных сталей. Вопросы сварки в энергомашиностроении. — Сб. статей ЦНИИТМАШ. М., Машгиз, 1962, с. 5—30.

3. **Гельман А. С., Слепак Э. С., Зыбко И. Ю.** Машина для стыковой сварки труб ЦСТ-200. Усовершенствование технологии и оборудования для сварки давлением элементов поверхностей нагрева котельных агрегатов. — Сб. статей № 74. М., ЦНИИТМАШ, 1967, с. 87—98.

4. **Гельман А. С., Ханкин В. П.** Сварка труб поверхностей нагрева из перлитных сталей с продувкой газом при оплавлении. Усовершенствование технологии и оборудования для сварки давлением элементов поверхностей нагрева котельных агрегатов. — Сб. статей № 74. М., ЦНИИТМАШ, 1967, с. 5—23.

5. **Герман С. И.** Электродуговая сварка теплоустойчивых сталей перлитного класса. М., Машгиз, 1963. 205 с.

6. **Земзин В. Н., Френкель Л. Д.** Сварные конструкции паровых и газовых турбин. М., Машгиз, 1962. 223 с.

7. **Земзин В. Н.** Жаропрочность сварных соединений. М., «Машиностроение», 1972. 270 с.

8. **Русинова И. Н., Баженов В. В.** Свойства сварных соединений стали 15Х1М1Ф после нормализации и отпуска. — «Сварочное производство», 1976, № 10, с. 23—24.

Глава 8

СВАРКА ВЫСОКОХРОМИСТЫХ МАРТЕНСИТНЫХ, МАРТЕНСИТНО-ФЕРРИТНЫХ И ФЕРРИТНЫХ СТАЛЕЙ

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА И КЛАССИФИКАЦИЯ

Хром от температуры плавления до низких температур имеет решетку объемноцентрированного куба, изоморфную α-железу. В связи с этим легирование железа хромом сужает область γ-растворов. Диаграмма состояния Fe—Cr приведена на рис. 1.

По влиянию хрома на положение γ-области на диаграмме состояния сплавов Fe — Cr, а также хромистых сталей, содержащих углерод, условно можно выделить стали: 1) с $\gamma \rightleftarrows \alpha$ превращением; 2) без $\gamma \rightleftarrows \alpha$ превращения; 3) с частичным превращением. При наличии в растворе около $\frac{1}{8}$ атомов Cr (~ 12% Cr по массе) поверхностная пленка, возникающая при окислении, приводит к пассивации этой поверхности. Сталь становится коррозионно-стойкой при относительно невысокой температуре. Для обеспечения окалиностойкости при более высоких температурах (800—1100° С) относительная массовая доля хрома в сталях должна быть увеличена (примерно до 30%). Для обеспечения коррозионной стойкости применительно к различным агрессивным средам концентрация хрома в сталях может быть различной. Хром по отношению к кислороду обладает несколько большим сродством, чем железо, и образует окисел Cr_2O_3 с высокой температурой плавления. Хром также обладает бо́льшим сродством к углероду, чем железо, и является карбидообразующим элементом. Он может входить в состав карбидов типа $(Fe, Cr)_3C$, но также образует карбиды типов Cr_7C_3 и $Cr_{23}C_6$, иногда с частичной заменой атомов хрома другими атомами, в частности железа, например $(Cr, Fe)_{23}C_6$. Карбиды хрома являются термически более стойкими, чем карбиды железа; они растворяются медленнее и при более высоких температурах. В связи с этим для гомогенизации твердых растворов Fe — Cr — C требуется более высокая температура и более длительная выдержка (рис. 2).

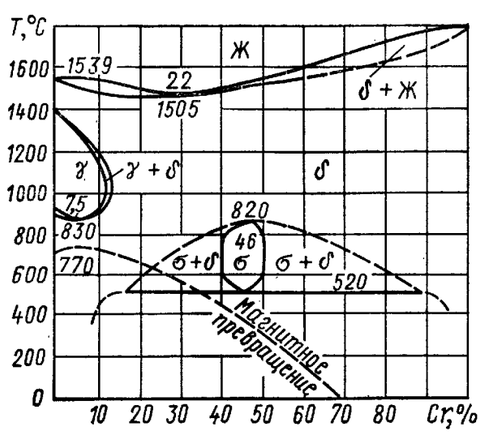


Рис. 1. Диаграмма состояния Fe—Cr

Температурная область существования γ-растворов в хромистых сталях изменяется в зависимости от содержания в них хрома и углерода (рис. 3), хотя она зависит и от содержания в сплаве других элементов, но в меньшей степени. Хромистые стали при содержании $C < 0{,}1\%$ и $Cr > 15 \div 16\%$ не имеют γ-фазы при любых температурах от комнатной до температуры плавления и являются ферритными.

Хром в сталях в связи с замедлением процессов распада $\gamma \rightarrow \alpha$ значительно снижает критические скорости охлаждения. Поэтому мартенсит в хромистых сталях может быть получен в результате бездиффузионного превращения аустенита, при содержании углерода значительно меньшем, чем в нелегированных углеродистых сталях (рис. 4). При более высоком содержании хрома (рис. 4, *в*)

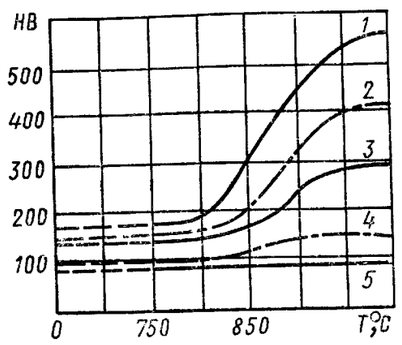


Рис. 2. Зависимость твердости хромистой стали от температуры и концентрации углерода:

1 — 12% Cr; 0,35% C; *2* — 12% Cr; 0,12% C; *3* — 12% Cr; 0,05% C; *4* — 12% Cr; 0,01% C; *5* — 13% Cr; 0,01% C

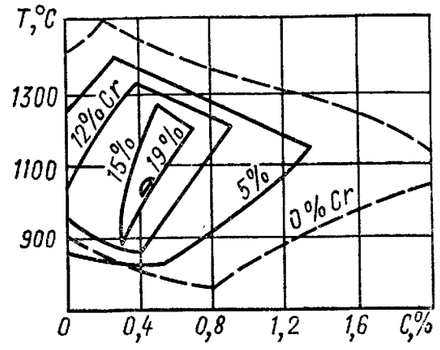


Рис. 3. Область существования γ-фазы в хромистой стали в зависимости от содержания хрома и углерода

устойчивость аустенита настолько высока, что даже при температуре его наименьшей устойчивости (~ 700° С) для его распада требуется около 300 с [3]. При непрерывном охлаждении (в условиях сварки) даже небольшие скорости охлаждения (около 0,2°С/с) в области температур 800—650° С приводят к получению пол-

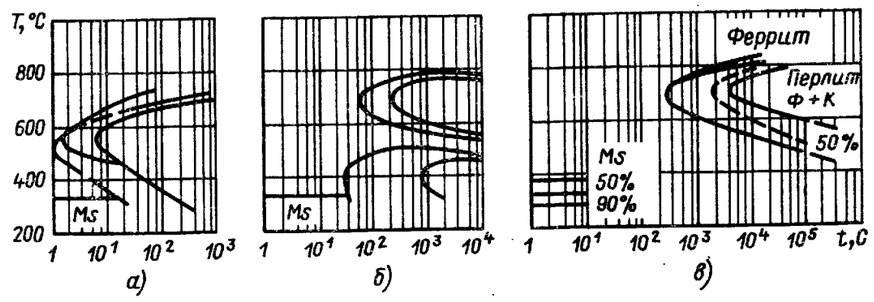


Рис. 4. Диаграммы изотермического превращения хромистых сталей с различным содержанием хрома:

а — 0,4% С и 0% Cr; *б* — 0,4% С и ~3,5% Cr; *в* — 0,11% С и 12,2% Cr

ностью мартенситной структуры. Оптимальные механические свойства, т. е. высокая прочность при достаточно высокой пластичности, достигается для таких хромистых сталей после двойной термической обработки — закалки и высокого отпуска.

Высоколегированные хромистые стали (обычно с содержанием 10,5—12% Cr) при дополнительном легировании молибденом, вольфрамом, ниобием и ванадием,

а иногда и никелем, обладают повышенным сопротивлением ползучести при работе под напряжением при повышенных температурах. Они используются как жаропрочные применительно к температурам эксплуатации примерно до 600° С.

Структура и свойства некоторых высокохромистых сталей изменяются в зависимости от режима термической обработки и температуры эксплуатации; стали в основном становятся хрупкими. В зависимости от химического состава стали и влияния термического воздействия в хромистых сталях наблюдаются: 475°-ная хрупкость; хрупкость, связанная с образованием σ-фазы; охрупчивание феррита, вызываемое нагревом до высоких температур. 475°-ная хрупкость появляется в хромистых сплавах и сталях при содержании 15—70% Cr после длительного воздействия температур 400—540° С (особенно около 475° С). Добавки Ti и Nb ускоряют процесс охрупчивания при 475° С. При небольших концентрациях хрома в сталях выдержка при 600—850° С не вызывает появления σ-фазы, хрупкой при более низких температурах. При содержании более 15—25% Cr σ-фаза выпадает интенсивно, особенно после выдержки при ~ 900° С. Марганец, молибден и некоторые другие легирующие элементы способны расширять область существования σ-фазы и интенсивность ее образования. Выпадение σ-фазы, а также процессы, вызывающие появление 475°-ной хрупкости, понижают коррозионную стойкость хромистых сталей. Кроме того, σ-фаза снижает сопротивление ползучести при высоких температурах. Исключить влияние 475°-ной хрупкости и выпадение σ-фазы можно нагревом этих сталей до температур, выше температур, способствующих появлению хрупкости (соответственно выше 550 и ~ 950° С), с последующим быстрым охлаждением до 400° С или более низкой температуры.

У высоколегированных хромистых сталей, находящихся в ферритном состоянии, при температуре выше 1150° С наблюдается склонность к быстрому росту зерна. Так как в таких сталях присутствует и карбидная фаза, то при быстром нагреве и охлаждении, характерном для условий сварки, растворяющиеся карбиды обогащают углеродом только микрообъемы металла, прилегающие к ним, без общей гомогенизации, в результате чего в этих участках создаются условия для протекания при охлаждении превращения $\gamma \rightarrow \alpha$. Наиболее вероятны эти процессы вблизи границ зерен. В результате таких процессов и создающихся при этом локальных напряжений металл после быстрого охлаждения становится малопластичным при обычных температурах. Пластичность повышается при последующем отжиге или высоком отпуске при 730—790° С (в зависимости от состава стали). Низкая пластичность, определяемая большим размером зерен, после отпуска не повышается.

При испытаниях надрезанных образцов на удар хрупкие разрушения, наблюдаемые при комнатных температурах, переходят в вязкие при повышении температур испытания. Температурный интервал, переходя в хрупкое состояние, снижается при некотором увеличении в стали углерода, а для ферритных сталей — азота (примерно в количестве 0,01 от концентрации хрома). Углерод и азот уменьшают склонность сталей к росту зерен при высоких температурах и улучшают сварочные свойства этих сталей.

В соответствии с влиянием хрома и углерода (при обычном содержании сопутствующих примесей) на кристаллическую решетку при температурах от 20° С до температуры плавления, по структуре при обычных (близких к комнатной) температурах различают хромистые стали классов: мартенситного, мартенситно-ферритного и ферритного (рис. 5).

Схема влияния хрома и углерода на выклинивание γ-области для высокохромистых сталей наиболее распространенных составов показана на рис. 6. Средне- и высоколегированные хромистые стали (до 12—13% Cr и $C \geqslant 0{,}05 \div 0{,}06\%$), имеющие область аустенита при высоких температурах, в результате охлаждения даже с умеренными скоростями при комнатной температуре имеют мартенситную структуру. При более высокой концентрации хрома (более 16%) и ~ 0,06% С сталь во время нагрева будет иметь, кроме аустенита, то или иное количество непревращенной ферритной фазы. Последующее охлаждение такой стали приводит к получению смешанной мартенситно-ферритной структуры. Увеличение содержа-

ния хрома в стали (при C = const) способствует относительному увеличению ферритной составляющей в структуре. Дальнейшее увеличение содержания хрома при малой концентрации углерода приводит к тому, что при любых температурах сохраняется ферритная структура сталей; такая структура получается и при любой скорости охлаждения; различие может быть только в относительном количестве выпавших карбидов. Таким образом, при $C > 0{,}06 \div 0{,}08\%$ стали с содержанием хрома до 12—13% будут относиться к мартенситному классу; при 13—16% — к мартенситно-ферритному, а имеющие более 16% — к ферритному. При более высокой концентрации углерода, соответственно, концентрации хрома, при которых конечная структура сталей изменяется от мартенситной к ферритной, становятся большими.

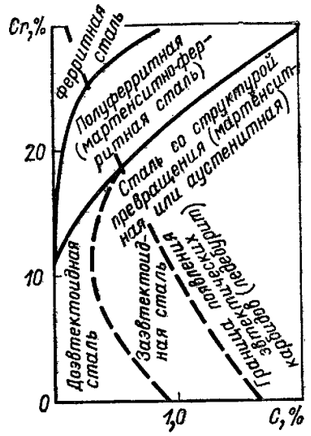


Рис. 5. Схематическая диаграмма состояния хромистой стали (тройной системы Fe—Cr—C)

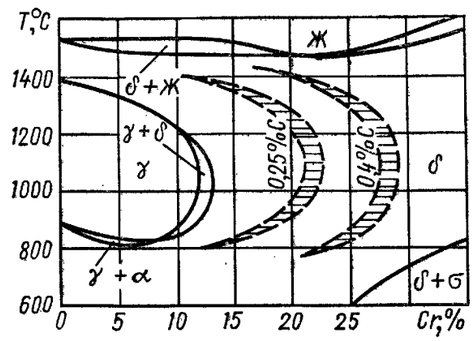


Рис. 6. Смещение γ-петли в системе Fe—Cr—C в зависимости от содержания углерода в стали

Наличие в стали других элементов (кроме Fe, Cr, C) может вызывать переход сталей из одного класса в другой. Введение аустенизирующих элементов при иных концентрациях хрома и углерода, например никеля и марганца, расширяет области получения мартенситных и мартенситно-ферритных сталей. Так, сталь, содержащая 0,1% C и 17% Cr, является ферритной; введение в сталь дополнительно ~ 2% Ni определяет получение мартенситно-ферритной или мартенситной структур. Так же как никель, влияет и азот, используемый в некоторых высокохромистых сталях как легирующий элемент, с определенными пределами его содержания в стали.

Иначе действуют элементы, являющиеся сильными карбидообразователями, например титан. Связывание углерода в карбиды (в данном случае типа TiC) к моменту распада аустенита приводит к уменьшению углерода в растворе и, как следствие, к уменьшению вероятности получения в структуре после полного охлажения мартенсита (или его значительных количеств). Введение карбидообразующих элементов в такие стали количественно связывают и с общим углеродом в стали; например, минимально необходимое количество титана определяется соотношением Ti = 5 C. В некоторые стали вводят несколько карбидообразующих элементов (W, Mo, V), хотя связывание ими углерода осуществляется менее полно, чем титаном.

Для повышения жаростойкости в качестве дополнительных легирующих элементов в высокохромистые стали вводят кремний и алюминий. Эти элементы действуют на структуру противоположно действию никеля и азота.

При некоторых видах термического воздействия хромистые высоколегированные ферритные стали приобретают склонность к межкристаллитной корро-

1. Составы, основные свойства и примерное назначение некоторых высокохромистых сталей (ГОСТ 5632—72)

Сталь *1	Содержание элементов, %										Структура	Основные свойства	Примерное назначение
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Ti	W	Mo	V	Прочие *2			
08Х13 (0Х13, ЭИ496)	≤0,08	≤0,80	≤0,80	12,0—14,0	—	—	—	—	—	—	Феррит и мартенсит	Коррозионно-стойкая, жаропрочная	Химическая аппаратура, цилиндры газовых турбин
12Х13 (1Х13)	0,09—0,15	≤0,80	≤0,80	12,0—14,0	—	—	—	—	—	—	Мартенсит и феррит	Коррозионно-стойкая, жаропрочная до 500° С	Лопатки паровых турбин, клапаны трубы
20Х13 (2Х13)	0,16—0,25	≤0,80	≤0,80	12,0—14,0	—	—	—	—	—	—	Мартенсит	Коррозионно-стойкая, жаропрочная до 500° С	То же
12Х17 (Х17)	≤0,12	≤0,80	≤0,80	16,0—18,0	—	—	—	—	—	—	Феррит	Коррозионно-стойкая, жаропрочная	Оборудование азотно-кислотных и консервных заводов
08Х17Т (0Х17Т, ЭИ645)	≤0,08	≤0,80	≤0,80	16,0—18,0	—	5C%—0,80	—	—	—	—	»	Жаростойкая, коррозионно-стойкая	Оборудование азотно-кислотных заводов. Детали в средах средней агрессивности
14Х17Н2 (1Х17Н2)	0,11—0,17	≤0,80	≤0,80	16,0—18,0	1,5—2,5	—	—	—	—	—	Мартенсит	Коррозионно-стойкая, жаропрочная	Оборудование азотно-кислотных, консервных заводов, бытовые детали
15Х18СЮ (Х18СЮ, ЭИ484)	≤0,15	≤0,80	1,0—1,5	17,0—20,0	—	—	—	—	—	0,7—1,2 Al	Феррит	Жаростойкая	Элементы котельных установок
15Х25Т (Х25Т, ЭИ349)	≤0,15	≤0,80	≤1,0	24,0—27,0	—	5·C—0,90	—	—	—	—	»	Коррозионно-стойкая, жаростойкая до 1100° С	Аппаратура для азотной и фосфорной кислот

Продолжение табл. 1

Сталь *1	Содержание элементов, %										Структура	Основные свойства	Примерное назначение
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Ti	W	Mo	V	Прочие *2			
15Х28 (Х28, ЭИ349)	⩽0,15	⩽0,80	⩽1,0	27,0—30,0	—	—	—	—	—	—	Феррит	Коррозионно-стойкая, жаростойкая до 1100°С Жаропрочная до 550° С	Аппаратура для азотной и фосфорной кислот
15Х11МФ (1Х11МФ)	0,12—0,19	⩽0,70	⩽0,50	10,0—11,5	—	—	—	0,6—0,8	0,25—0,40	—	Мартенсит и феррит	Жаропрочная до 580° С	Рабочие и направляющие лопатки паровых турбин
15Х11МФБ	0,10—0,18	0,4—0,8	⩽0,55	10,0—12,0	0,8—1,2	—	—	0,5—0,7	0,20—0,35	0,1—0,25 Nb	Мартенсит и феррит	Жаропрочная до 580° С	—
15Х11МВФ	0,14—0,18	0,5—1,0	0,2—0,55	10,5—12,5	0,5—0,8	—	0,8—1,1	0,50—0,75	0,15—0,30	—	Мартенсит и феррит	То же	—
15Х12ВНМФ (1Х12ВНМФ, ЭИ802)	0,12—0,18	0,5—0,9	⩽0,40	11,0—13,0	0,4—0,8	—	0,7—1,1	0,5—0,7	0,15—0,30	—	Мартенсит и феррит	Жаропрочная до 580° С, жаростойкая до 750° С	Диски компенсаторов, лопатки и другие нагруженные детали
14Х12В2МФ (1Х12В2МФ, ЭИ756)	0,10—0,17	0,5—0,8	⩽0,50	11,0—13,0	—	—	1,7—2,2	0,6—0,9	0,15—0,30	—	То же	Жаропрочная до 600° С	—
13Х11Н2В2МФ (1Х12Н2ВМФ, ЭИ961)	0,10—0,16	⩽0,60	⩽0,60	10,5—12,0	1,50—1,80	—	1,6—2,0	0,35—0,50	0,18—0,30	—	Мартенсит	Жаропрочная до 610° С, жаростойкая до 750° С	Диски компенсаторов, лопатки и другие нагруженные детали
13Х14Н3В2ФР (ЭИ736)	0,10—0,16	⩽0,60	⩽0,60	13,0—15,0	2,8—3,4	0,05	1,0—2,2	—	0,18—0,28	—	Мартенсит	—	—

*1 В скобках даны прежние обозначения марок.
*2 У всех сталей ограничения по S ⩽ 0,025% и P ⩽ 0,03%.

зии (МКК). В сталях такого типа быстрое охлаждение с температуры выше ~900° С, полученное при высоких температурах границами зерен пересыщение углеродом и азотом приводит в процессе охлаждения к выпадению особых фаз, обедняющих хромом окружающие объемы металла. По таким участкам при воздействии на поверхность агрессивной окислительной среды коррозия проникает внутрь металла. В связи с большей диффузионной подвижностью хрома в решетке феррита, по сравнению с подвижностью в плотноупакованной аустенитной решетке, пассивация, при термическом воздействии уменьшающая склонность к МКК, для высокохромистых сталей происходит быстрее, чем для аустенитных, например хромоникелевых, сталей.

Сварочные свойства хромистых сталей и свойства сварных соединений зависят от того, к какому классу относится свариваемый металл. Сварочные свойства мартенситно-ферритных сталей, хотя и являются промежуточными между мартенситными и ферритными сталями, приближаются к свойствам сталей мартенситного класса.

Составы наиболее распространенных, применяемых в сварных изделиях высоколегированных хромистых сталей, выпускаемых в СССР, и их примерное назначение приведены в табл. 1.

Высокохромистые стали используют в качестве коррозионно-стойких, жаростойких и жаропрочных. Из коррозионно-стойких (достаточно стойких против атмосферной коррозии и в слабоагрессивных жидких средах) обычно применяют стали с 13% Cr — соответственно марок 08Х13, 12Х13 и 20Х13. Одновременно эти стали обладают жаростойкостью до ~ 650° С и достаточной жаропрочностью до 480—500° С.

Коррозионная стойкость сталей в жидких средах средней агрессивности достигается повышением содержания хрома до 17%. При этом стали иногда дополнительно легируются Ni, Mo, Ti (соответственно марки 12Х17, 08Х17Т, 14Х17Н2). Жаростойкость этих сталей несколько выше, чем при 13% Cr. Дальнейшее повышение жаростойкости достигается при увеличении в стали концентрации хрома до 25—30% (стали марок 15Х25Т, 15Х28Т).

Жаропрочными, допускающими длительную работу при значительных напряжениях при температурах до 580—640° С, являются стали с ~ 11% Cr, дополнительно легированные Mo, V, Nb и другими элементами (стали марок 15Х11МФ, 15Х11МБФ, 15Х12ВНМФ, 13Х11Н2В2МФ и др.).

ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СВАРКЕ

Свойства сварных соединений высокохромистых сталей могут быть получены наиболее близкими к свойствам катаного или кованого основного металла только в тех случаях, когда химический состав металла швов является подобным химическому составу свариваемого металла и после сварки возможна термическая обработка в виде высокого отпуска.

Применение швов, состав которых аналогичен составу свариваемого металла, без усложнения технологии (предварительного и сопутствующего подогрева) и последующей термической обработки во многих случаях приводит к появлению в сварных швах и в зоне термического воздействия сварки трещин и к низкой деформационной способности сварных соединений. В таких случаях приходится отказываться от получения швов, состав которых подобен составу свариваемой хромистой стали. Более работоспособные сварные соединения получаются при аустенитной или аустенитно-ферритной структуре сварных швов, обычно хромоникелевых, с достаточным количеством аустенизаторов, в основном никеля и марганца. При таких швах последующая термическая обработка по режиму, благоприятному для измененного сварочным термодеформационным циклом основного металла, как правило, ухудшает свойства металла шва и вызывает резкие перепады остаточных напряжений вблизи границы сплавления. Поэтому термическая обработка для таких разнородных по структуре сварных соединений

применяется только для некоторых изделий из высокохромистых сталей, главным образом с целью улучшения коррозионной стойкости.

Применение высоколегированных хромоникелевых материалов аустенитного или аустенитно-ферритного классов, как правило, не обеспечивает равнопрочности металла швов основному материалу, хотя при правильном подборе удовлетворяет требованиям к сварным соединениям по коррозионной стойкости и жаростойкости. Даже при получении швов, состав которых подобен составу основного металла, необходимо учитывать, что часто наилучшие свойства сварных соединений могут быть получены, когда шов по своему составу несколько отличается от состава свариваемой стали, например имеет меньшую концентрацию углерода, содержит некоторое количество титана и т. д. В связи с тем, что такое регулирование состава металла шва легче обеспечивается при дуговой сварке, эти методы сварки наиболее распространены при изготовлении и ремонте изделий из высокохромистых сталей. Изделия из высокохромистых сталей сваривают ручной дуговой сваркой покрытыми электродами, а также применяют дуговую сварку плавящимся электродом в углекислом газе и его смесях с инертными газами, сварку плавящимся и неплавящимся электродами в инертных газах (аргоне, аргоногелиевых смесях) и автоматическую сварку под специальными флюсами.

В связи с тем, что водород, растворяющийся при сварке в расплавленном металле, усиливает склонность к образованию холодных трещин в малопластичном металле швов и металле околошовных зон, для ручной сварки высокохромистых сталей нельзя применять электроды с покрытиями, содержащими органические соединения, в качестве газообразующих. Поэтому используют электроды

с основными покрытиями, при которых газовая защита сварочной зоны осуществляется в результате распада карбонатов покрытия, в основном мрамора, по схеме

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \rightarrow CaO + CO + \frac{1}{2} O_2.$$

Образующиеся при этом высококальциевые шлаки благоприятны для удаления из сварочной ванны серы и фосфора, которые ограничиваются в высокохромистых сталях в большей степени (см. табл. 1), чем в обычных углеродистых. Окислительное влияние газовой фазы (CO_2 и продуктов ее распада) компенсируется введением в электродный стержень или чаще в электродное покрытие элементов с большим сродством к кислороду. Сварку такими электродами выполняют на постоянном токе обратной полярности. Для уменьшения возможного поглощения водорода перед сваркой электроды следует прокаливать (режим прокалки 450—500° С, 2 ч) [3].

Для высокохромистых сталей успешно применяется дуговая сварка в инертных газах, как правило, в аргоне и некоторых смесях на его основе, в основном неплавящимся вольфрамовым электродом; присадочный материал подбирают в соответствии с желаемым составом наплавленного металла. При этом виде сварки в шов почти без потерь удается вводить такие активные элементы (и полезные по свойствам металла шва), как титан и алюминий. Однако из-за невысокой производительности и повышения стоимости по сравнению с другими видами дуговой сварки, применение этого вида сварки ограничивается изготовлением изделий

2. Составы сварочных проволок, применяемых при изготовлении покрытых электродов для сварки высокохромистых сталей и механизированных видов их сварки

Сварочная проволока	Техническая документация для поставки	Химический состав, %							Области применения
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Ti	P, не более, при 0,025 S	Прочие элементы	
Св-12Х13	ГОСТ 2246-70	0,09—0,14	0,3—0,7	0,3—0,7	12—14	⩽0,60	—	0,030	—	Для изготовления электродов и механизированной сварки коррозионно-стойких высокохромистых сталей
Св-20Х13		0,16—0,24	⩽0,6	⩽0,6	12—14	—	—	0,030	—	
Св-06Х14		⩽0,08	0,3—0,7	0,3—0,7	13—15	⩽0,60	—	0,030	—	
Св-08Х14ГНТ		⩽0,10	0,9—1,3	0,25—0,65	12,5—14,5	0,4—0,9	0,6—1,0	0,035	—	
Св-10Х17Т		⩽0,12	⩽0,7	⩽0,8	16—18	⩽0,6	0,2—0,5	0,035	—	
Св-13Х25Т		⩽0,15	⩽0,8	⩽1,0	23—27	⩽0,6	0,2—0,5	0,035	—	
Св-12Х11НМФ	ГОСТ 2246—70	0,08—0,15	0,35—0,65	0,25—0,55	10,5—12,0	0,6—0,9	—	0,030	0,6—0,9 Mo 0,25—0,50 V	Для изготовления электродов для сварки высокохромистых жаропрочных сталей
Св-10Х11НВМФ		0,08—0,13	0,35—0,65	0,3—0,6	10,5—12,0	0,8—1,1	—		1—1,3 Mo 0,25—0,50 V 1,0—1,4 W	
Св-15Х12ГНМВФ (ЭП-390)	ЧМТУ/ЦНИИЧМ 671—62	0,12—0,17	0,9—1,3	⩽0,6	11—12,5	0,6—0,9	—	0,030	0,7—1,1 Mo, 0,8—1,2 W, 0,2—0,4 V	Для сварки под флюсом и в углекислом газе высокохромистых жаропрочных сталей
Св-15Х12НМВФБ (ЭП-249)	ЧМТУ/ЦНИИЧМ 442—61	0,13—0,18	0,9—1,3	0,3—0,6	11—12,5	0,6—0,9	—	0,030	0,8—1,2 Mo, 0,8—1,2 W, 0,25—0,45 V, 0,15—0,35 Nb	
Св-08Х18Н2ГТ (ЭИ-157)	ЧМТУ/ЦНИИЧМ 277—60	⩽0,10	0,9—1,3	0,25—0,65	17—19	2,0—2,5	0,6—1,3	0,030	—	Для сварки стали 14Х17Н2 под флюсом АН-18 и в углекислом газе

малых толщин и выполнением корневого валика в многослойных швах металла больших толщин, например в изделиях для турбостроения.

Азот является полезной примесью для металла ряда высокохромистых швов. Однако при концентрации в сварочной ванне более 0,08% он может вызывать пористость. Поэтому при сварке необходимо обеспечить хорошую защиту дугового пространства от воздуха и не допускать большего количества азота в защитных газах.

При сварке плавящимся электродом в CO_2 обычно обеспечивается достаточное оттеснение воздуха от сварочной зоны, однако металл может значительно окисляться. Для предотвращения окисления основных легирующих элементов в электродную проволоку необходимо в достаточных количествах вводить раскислители. Принципиально возможна и разработка порошковых проволок с дополнительными шлакообразующими в составе вводимого порошка.

Сварка высокохромистых сталей под флюсом также требует разработки специальных сварочных материалов. Применяемые для сварки углеродистых сталей высококремнистые, высокомарганцовистые флюсы для высокохромистых сталей непригодны в связи с кремнемарганцевовосстановительными процессами. При этом происходит выгорание хрома (иногда до 2% по сравнению с исходным металлом) и появление в швах повышенных количеств кремния и марганца, понижающих свойства высокохромистых сталей, в частности уменьшая их пластичность и вязкость. Фторидные флюсы не обеспечивают хорошего формирования швов.

3. Составы сварочных проволок аустенитного и аустенитно-ферритного классов, применяемых при механизированной сварке высокохромистых сталей и типовых для изготовления покрытых электродов

Сварочная проволока	Техническая документация для поставки	Химический состав, %							Области применения
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Ti	S / P не более	
Св-07Х25Н13 Св-13Х25Н18	ГОСТ 2246–70	⩽0,09 ⩽0,15	1,0–2,0 1,0–2,0	0,5–1,0 ⩽0,5	23–26 24–26,5	12–14 17–20	— —	0,018 / 0,025 0,015 / 0,025	—	Для изготовления электродов и для механизированной сварки коррозионно-стойких сталей
Св-08Х20Н9Г7Т		⩽0,10	5,0–8,0	0,5–1,0	18,5–22	8–10	0,6–0,9	0,018 / 0,035	—	Для сварки под флюсом и в CO_2 коррозионно-стойких сталей (без требований по стойкости против МКК)
Св-06Х25Н12ТЮ		⩽0,08	⩽0,80	0,6–1,0	24–26,5	11,5–13,5	0,6–1,0	0,020 / 0,030	0,4–0,8 Al	Для сварки под флюсом АН-26 и в углекислом газе сталей с 13–17% Cr
Св-06Х20Н11М3ТБ	ГОСТ 2246–70	⩽0,08	⩽0,80	0,5–1,0	19–21	10–12	0,6–1,0	0,018 / 0,030	2,5–3,0 Mo, 0,6–0,9 Nb	Для сварки под флюсом АН-26 стали с 17% Cr
Св-08Х19Н10Г2Б Св-06Х24Н6ТАФМ		0,05–0,10 ⩽0,08	1,8–2,2 ⩽0,80	0,2–0,45 ⩽0,7	18,5–20,5 23–25,5	9,5–10,5 5,5–6,5	— 0,08–0,2	0,018 / 0,030 0,018 / 0,030	0,6–0,9 Nb 0,06–0,12 Mo 0,08–0,15 V 0,1–0,2 N_2	Для изготовления электродов для сварки коррозионно-стойких сталей
Св-08Х20Н15ФБЮ (ЭП-444)	ЧМТУ/ЦНИИЧМ 849–63	⩽0,10	1,0–2,0	0,5–1,0	19–21	14–16	—	0,020 / 0,030	0,1–0,2 V 0,9–1,3 Nb 0,4–0,6 Al	Для сварки под флюсом АП-26 и в углекислом газе сталей с 13–17 % Cr

Для сварки высокохромистых сталей рекомендуются либо высокоосновные флюсы 48-0Ф-6, АН-26, либо слабоокислительные (низкокремнистые с некоторым количеством окислов железа) АН-17, АН-18.

Флюсы АН-17, АН-18 и 48-ОФ-6 проверялись в ИЭС им. Патона с использованием специально разработанных проволок типа 15Х12НМВФБ и 15Х12ГНМВФ для сварки высокохромистых жаропрочных сталей [1, 2].

В связи с тем, что при использовании флюса 48-ОФ-6 выгорание примесей меньше, чем при использовании флюса АН-17, прочность и длительная прочность металла швов, выполненных с флюсом 48-0Ф-6, выше, но при меньшей длительной пластичности. Для увеличения их длительной пластичности требуется применение при флюсе 48-ОФ-6 менее легированной электродной проволоки.

При выборе вида сварки, сварочных материалов и режимов сварки высокохромистых сталей, особенно жаропрочных, необходимо учитывать, что даже после высокого отпуска небольшие отклонения химического состава металла швов (по некоторым элементам в пределах десятых долей процента) могут приводить к значительному изменению их эксплуатационных свойств. Причиной этого является гетерогенность структуры металла (например, наличие зерен структурно-свободного феррита в сорбитной основе отпущенного мартенсита). При использовании аустенитного или аустенитно-ферритного наплавленного металла необходимо учитывать и долю основного металла, попадающего в металл шва и влияющего на его состав, структуру и свойства.

Применяемые при всех видах дуговой сварки сварочные материалы нужно выбирать в зависимости от условий последующей эксплуатации сварных соединений высокохромистых сталей. Так, для получения коррозионной стойкости и жароупорности сварных соединений используют сварочные материалы, обеспечивающие получение швов, структура которых подобна структуре основного металла, а также аустенитно-ферритную структуру на базе высоколегированных хромоникелевых сталей. Для обеспечения жаропрочности сварных соединений их достаточное сопротивление ползучести и длительная прочность на уровне свойств основного металла достигаются только при составах металла швов, близких к составу основного металла.

При ручной сварке высокохромистых сталей покрытыми электродами основное легирование наплавленного металла обеспечивается металлом электродного стержня, хотя иногда некоторое дополнительное легирование обеспечивается введением необходимых ферросплавов или металлических добавок в покрытия основного типа.

При сварке в защитных газах и под плавлеными флюсами состав наплавленного металла по легирующим элементам определяется составами применяемых электродных проволок, с учетом потерь элементов (испарением, выгоранием) в процессе сварки. Для электродных стержней покрытых электродов и электродных проволок для автоматической сварки под флюсом и полуавтоматической в защитных газах используют сварочные проволоки специальных составов по ГОСТ 2246—70 или изготовляемые по специальным техническим условиям. Наиболее распространенные сварочные проволоки, обеспечивающие получение швов, подобных по составу высокохромистым сталям, приведены в табл. 2.

Высоколегированные сварочные проволоки аустенитного и аустенитно-ферритного классов, применяемые при сварке высокохромистых сталей под флюсом и в защитных газах, а также типовые, используемые для изготовления покрытых электродов для сварки таких сталей, приведены в табл. 3. Для изготовления электродов иногда можно использовать и другие сварочные проволоки, в частности поставляемые по ГОСТ 2246—70. В этих случаях для выполнения однослойных швов (при небольшой толщине свариваемого высокохромистого металла) и корневого шва многослойных швов при ручной сварке покрытыми электродами и сварке в CO_2 следует применять сварочные материалы (типа Х25Н18), обеспечивающие получение швов большей аустенитности. Для многослойных швов (трехслойных и выполняемых в большее число слоев) с целью исключения горячих трещин предпочтительнее электроды и электродные проволоки, обеспечивающие получение наплавленного металла меньшей аустенитности (например, типа Х25Н13).

Составы наиболее часто применяемых флюсов для автоматической сварки под флюсом высокохромистых сталей приведены в табл. 4.

При сварке в углекислом газе применяется углекислота по ГОСТ 8050—76, при аргонодуговой — аргон по ГОСТ 10157—73.

Некоторые марки электродов, применяемых при сварке разнообразных высокохромистых сталей, определяются назначением и требуемыми свойствами сварных соединений.

4. Составы флюсов, применяемых при сварке высокохромистых сталей

Флюс	Химический состав, %						
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	CaF_2	FeO
АН-17	17—21,0	21,0—25,0	14,5—18,5	9,0—12,0	4,0—6,0	19,0—23,0	7,5—9,5
АН-26	30,0—32,0	20,0—22.0	5,0—6,5	16,0—18,8	6,0—9,0	20,0—24,0	⩽ 1,0
48-ОФ-6*	⩽ 4,0	20,0—27,0	16,0—23,0	⩽ 3,0	⩽ 0,3	45,0—60,0	⩽ 1,5

* Требуется прокалка при 850° С.

СВАРКА МАРТЕНСИТНЫХ И МАРТЕНСИТНО-ФЕРРИТНЫХ СТАЛЕЙ

Стали мартенситного класса в условиях сварочного термического цикла в околошовных участках (а также и в металле шва, если по составу он подобен свариваемому металлу) закаливаются на мартенсит с высокой твердостью и низкой деформационной способностью. В результате деформаций, сопровождающих сварку, а также длительного действия высоких остаточных и структурных напряжений, имеющихся в сварных соединениях в исходном состоянии после сварки, в таком металле возможно образование холодных трещин. Они образуются на последней стадии непрерывного охлаждения (при температурах ~ 100° С и более низких) или при выдержке металла при комнатных температурах. Водород, находящийся в сварных соединениях и диффундирующих даже при низких температурах, способствует охрупчиванию металла и образованию таких холодных трещин.

Крупнозернистый металл швов, а также металл в зоне термического влияния, более склонен к образованию трещин, чем мелкозернистый. Поэтому модифицирование металла швов (например, титаном) и применение более жестких режимов (с меньшей погонной энергией) уменьшают вероятность образования трещин.

Увеличение жесткости свариваемых изделий повышает вероятность образования холодных трещин, причем в тем большей степени, чем меньшей деформационной способностью обладает закаленный металл. Сварка в CO_2 без предварительного подогрева изделий небольшой жесткости не вызывает появления трещин: для стали марки 20Х13 при толщине не более 8—10 мм; для изделий из стали 12Х12 при толщине до 10—12 мм, а для изделий из стали 08Х13 при толщине до 18 мм.

Предварительный и сопутствующий сварке подогрев обычно предотвращает образование трещин. Для хромистых сталей мартенситного и мартенситно-ферритных классов, как правило, рекомендуется общий (иногда местный, с использованием, в частности, гибких индукторов, питаемых от сварочных трансформаторов) подогрев до 200—450° С. Температура подогрева назначается большей с увеличением склонности к закалке (в основном с повышением концентрации углерода в стали) и жесткости изделия. Однако, согласно исследованиям Р. А. Козлова, предпочтительней металл не нагревать до температур, вызывающих повышение хрупкости (например, в связи с синеломкостью), ограничивая температуру сопутствующего сварке подогрева. Так, например, для стали 08Х13 такой температурой оказывается ~ 100—120° С. Соответственно могут быть ограничены и температуры подогрева других сталей, например 12Х13, 20Х13. Верхний интервал длительного сопутствующего подогрева должен ограничиваться температурой появления отпускной хрупкости или синеломкости сталей (200—250° С). При любом сопутствующем подогреве опасно охлаждение ветром (или сквозняками), так как при этом усиливается вероятность появления трещин.

Подогрев изделий при сварке до низких или высоких температур не предохраняет металл шва и в зоне термического влияния от распада по мартенситному механизму при охлаждении до комнатных температур. Поэтому в состоянии после сварки с характерным для этих условий быстрым (а при подогреве и охлаждении после сварки на воздухе — ускоренным) охлаждением сварные соединения имеют высокую твердость и достаточно низкую вязкость.

Характерные твердость и ударная вязкость при надрезе в основном металле вблизи зоны сплавления для трех марок сталей показаны на рис. 7 [1, 2].

Для улучшения структуры и свойств необходимо осуществлять высокий отпуск. Влияние температуры последующего отпуска на свойства металла в зоне термического влияния сварных соединений сталей двух марок приведено на рис. 8 [1]. Структура после отпуска характеризуется сорбитом отпуска, с тем или иным количеством свободного феррита. Лучшие свойства достигаются при полном или почти полном отсутствии в структуре свободного феррита.

Однако термическая обработка не может проводиться вне временной связи со сварочной операцией. Если непосредственно после сварки изделие остудить до комнатных температур, то в металле швов и зон термического влияния будет получена структура мартенсита. Последующий высокий отпуск при термической обработке приводит к получению сорбитной структуры. Однако за период охлаждения при температурах ниже ~100° С и за период вылеживания изделия до начала термической обработки в сварных соединениях могут образовываться трещины как выходящие на поверхность, так и внутренние надрывы размером (длиной) 1—4 мм, которые потом могут развиваться.

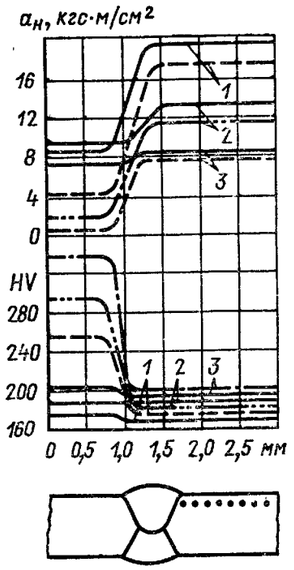


Рис. 7. Твердость HV и ударная вязкость $a_н$ металла сварных соединений сталей 08Х13 (*1*), 12Х13 (*2*) и 20Х13 (*3*) в состоянии после сварки (штриховые линии) и после отпуска при 700° С в течение 3 ч (сплошные линии)

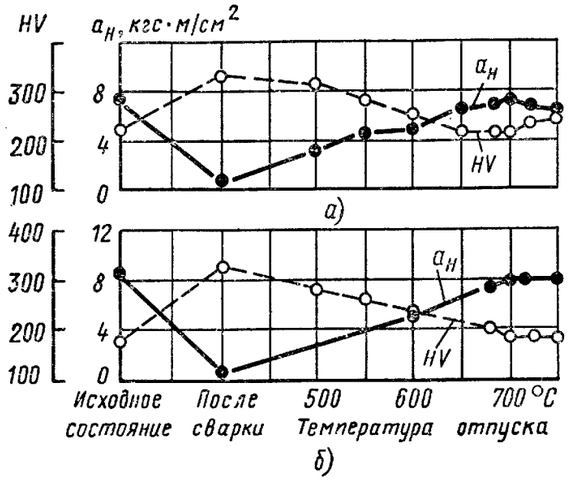


Рис. 8. Твердость и ударная вязкость металла околошовной зоны вблизи границы сплавления сварных соединений сталей 14Х17Н2 (*а*) и 20Х13 (*б*) толщиной 4 мм после сварки и отпуска

Если после сварки осуществляемой с подогревом выше верхней мартенситной точки сваренное изделие поместить в печь не снижая его температуры ниже ~ 350° С, то мартенситного превращения в швах и в зонах термического влияния не произойдет, трещин в соединениях не образуется, но конечная структура будет грубозернистой ферритно-карбидной. Металл с такой структурой обладает малой прочностью и низкой вязкостью.

Наилучшие свойства могут быть получены, когда после сварки с температур сопутствующего подогрева производят «подстуживание» примерно до 100° С, выдержку при этой температуре в течение 2 ч (для завершения распада аустенит-мартенсит, без образования трещин) и посадку в печь для термической обработки всего изделия [4]. Как показали исследования Р. А. Козлова, такие же результаты получаются, если металлу изделия или в области выполненных сварных соединений дать «отдых» при 100—120° С в течение $\geqslant$ 10 ч. После такого отдыха изделие можно охлаждать до комнатной температуры и выдерживать до термической обработки в течение длительного времени. Трещин после такого «отдыха» не наблюдается, а структура и свойства после термической обработки отпуска получаются оптимальными. Схема термических режимов *3* и *4*, обеспечивающих получение сварных соединений без трещин и с хорошими конечными структурами и свойствами, приведена на рис. 9.

Свойства сварных соединений для обеспечения равной прочности с основным металлом зависят не только от режима термической обработки изделия после сварки, но и от режима термической обработки перед сваркой. Если отпуск после закалки перед сваркой производился при температурах ниже, чем те, которые использовались при термической обработке после сварки, то в сварных соединениях обнаруживается наиболее слабая зона на небольшом расстоянии (до 4—5 мм) от границы сплавления, в которой при сварке достигалась температура наиболее разупрочняющего отпуска. Термическая обработка изделия после сварки в таких случаях не восстанавливает свойств металла в этой зоне до свойств основного металла (рис. 10) [4]. Для обеспечения равной прочности отпуск после сварки рекомендуется осуществлять при температуре приблизительно на 20° С ниже температуры отпуска заготовок до сварки.

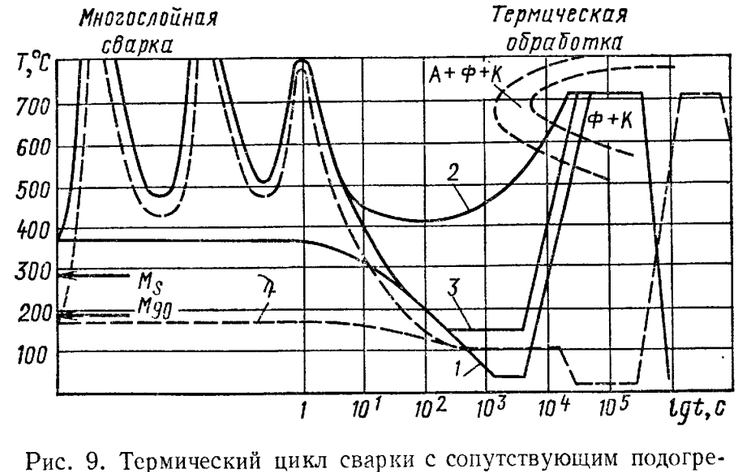


Рис. 9. Термический цикл сварки с сопутствующим подогревом и последующей термической обработкой закаливающихся хромистых сталей; сплошные кривые — сопутствующий подогрев до ~380° С:

1 — после сварки — охлаждение до комнатной температуры; *2* — после сварки посадка в печь; *3* — после сварки подстуживание и выдержка до термической обработки; штриховые кривые — сопутствующий подогрев до 160° С; *4* — после сварки: «отдых» при ~100° С в течение 10 ч

Термическая обработка сварных соединений после сварки влияет не только на механические свойства, но и на коррозионную стойкость, жаропрочность и другие свойства. Например, контактирование закаленного металла шва и металла околошовной зоны с незакаленным (отпущенным) основным металлом приводит сварные соединения стали 14Х17Н2 в состояние отсутствия коррозионной стойкости, и при воздействии агрессивной среды появляется избирательная коррозия закаленной зоны. При этом коррозионная стойкость зависит и от соотношения поверхностей шва и основного металла, взаимодействующих с агрессивной средой (рис. 11) [1].

Хромистые стали обладают некоторой склонностью к межкристаллитной коррозии (МКК); это характерно не только для ферритных, но и для мартенситно-ферритных сталей. Особо высокую склонность к МКК они приобретают после быстрого охлаждения с высоких температур. Для восстановления стойкости против МКК можно использовать высокий отпуск, причем его температура и длительность для разных сталей различаются.

Мартенситно-ферритные высокохромистые стали можно использовать и как весьма кавитационно-стойкие, применительно, например, к рабочим колесам мощных гидротурбин. В ЦНИИТМАШе разработаны стали 0Х12НД и 00Х12Н3Д, легированные Ni и Cu ≈ 1% [5], которые и в больших сечениях в литом и кованом состоянии после оптимальной термической обработки обеспечивают получение высокой прочности, коррозионной и кавитационной стойкости. Сварка



Рис. 10. Влияние режима термической обработки на твердость основного металла и металла в зоне высокого отпуска стали 15Х12ВМФ:

1 — исходная высокая твердость (отпуск до сварки при 680° С); *2* — исходная низкая твердость (отпуск до сварки при 700° С); ▲ — твердость основного металла; ● — твердость металла в зоне высокого отпуска

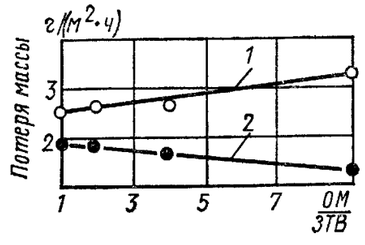


Рис. 11. Влияние соотношения поверхностей заготовок из незакаленного основного металла (ОМ) и закаленной в зоне термического влияния (ЗТВ) стали 14Х17Н2 на скорость коррозии в кипящей 56%-ной азотной кислоте:

1 — скорость коррозии закаленного металла; *2* — скорость коррозии незакаленного металла

этих сталей может осуществляться электродами УОНИ-13/НЖ при предварительном и сопутствующем подогреве при 620 К или специально разработанными электродами марки ЦЛ-41, обеспечивающими получение наплавленного металла состава, аналогичного составу стали 0Х12НД, при подогреве при 480 К [5].

Некоторые рекомендации по выбору сварочных материалов для различных видов дуговой сварки мартенситных и мартенситно-ферритных сталей приведены в табл. 5. Сведения о составе наплавленного металла и некоторых его кратковременных свойствах и длительной прочности применительно к наиболее распространенным сварочным материалам (по видам сварки) приведены в табл. 6—10.

5. Сварочные материалы для сварки мартенситных и мартенситно-ферритных сталей

Марка свариваемой стали	Сварка		
	ручная штучными электродами		
	Тип электрода по ГОСТ 10052—75	Марка электрода	Марка электродного стержня
08Х13, 12Х13	Э-12Х13	УОНИ-13/1Х13	Св-12Х13
15Х11МФ	Э-12Х11НМФ	КТИ-9	Св-12Х11НМФ
15Х11ВМФ, Х11ЛБ	Э-12Х11НБМФ	КТИ-10	Св-10Х11НВМФ
15Х11МБФ, Х11ЛА	Э-12Х11НВМФ	КТИ-10	Св-10Х11НВМФ
14Х11В2МФ	Э-14Х11НВМФ	ЦЛ-32	Св-10Х11НВМФ

Продолжение табл. 5.

Марка свариваемой стали	Сварка		
	ручная штучными электродами		
	Тип электрода по ГОСТ 10052—75	Марка электрода	Марка электродного стержня
14Х17Н2	Э-09Х19НЮГМБ	ЭА 898/21	Св-07Х19Н10Б
	—	АНВ-2	Св-08Х18Н2ГТ
0Х12НДЛ	Э-06Х13Н	ЦЛ-41	Св-06Х14

Марка свариваемой стали	Сварка		
	в CO_2	автоматическая под флюсом	
	Марка электродной проволоки	Марка электродной проволоки (ГОСТ 2246—70, ТУ)	Марка флюса
08Х13, 12Х13	Св-08Х14ГНТ (Св-12Х13)	Св-06Х14 Св-08Х14ГНТ	АН-30, АН-17, АН-18
15Х11МФ	—	—	—
15Х11ВМФ, Х11ЛБ	Св-15Х12ГНМВФ	—	—
15Х11МБФ, Х11ЛА	Св-15Х12НМВФБ, Св-15Х12ГНМВФ	Св-10Х11ВМФН	АН-10
14Х11В2МФ	Св-15Х12НМВФБ, Св-15Х12ГНМВФ	Св-15Х12НМВФБ Св-15Х12ГНМВФ	АН-17 (48-ОФ-6) АН-17
14Х17Н2	Св-08Х18Н2ГТ, (Св-08Х14ГНТ)	Св-08Х18Н2ГТ (ЭП-157)	АН-18

6. Механические свойства металла швов мартенситных высокохромистых сталей, выполненных сваркой в углекислом газе и подвергнутых отпуску при 700°С в течение 3 ч

Марка свариваемой стали	Толщина свариваемой стали, мм	Марка электродной проволоки	Механические свойства				
			$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$	δ	ψ	$a_н$, кгс·м/см²
			кгс/мм²		%		
12Х13	10	Св-12Х13	56,0	69,0	17,0	51,0	9,0
	10	Св-08Х14ГНТ	58,0	74,0	20,0	52,0	8,0
20Х13	10	Св-06Х14	56,0	70,0	19,0	50,0	6,6
	10	Св-08Х14ГНТ	58,0*	74,0	18,0	52,0	6,5
	4	Св-12Х13	54,1	74,0	23,6	47,0	7,2
	4	Св-06Х14	60,8	74,2	20,0	42,0	4,8
14Х17Н2	8	Св-06Х14	61,3	75,0	17,0	41,0	9,5
	8	Св-08Х18Н2ГТ	60,8	79,0	21,0	49,0	8,6

* Длительная прочность 14 кгс/мм² при 500°С, 10^3 ч.

Примечание. При толщине свариваемого металла 4 мм — сварка выполнялась в один слой, при толщине 8 и 10 мм — в три слоя.

Тип электрода по ГОСТ 10052—75	Марка электрода (марка электродного стержня по ГОСТ 2246—70)	Химический состав наплавленного металла, %						
		C	Cr	Ni	Mo	W	Cu	V
Э-12Х13	УОНИ-13/1Х13 (Св-12Х13)	0,08—0,16	11,0—14,0	⩽ 0,6	—	—	—	—
Э-12Х11НМФ	КТИ-9 (Св-12Х11НМФ)	0,09—0,15	10,0—12,0	0,6—0,9	0,6—0,9	—	—	0,2—0,4
Э-12Х11НВМФ	КТИ-10 (Св-10Х11НВМФ)	0,09—0,15	10,0—12,0	0,6—0,9	0,6—0,9	0,8—1,3	—	0,2—0,4
Э-14Х11НВМФ	ЦЛ-32 (Св-10Х11НВМФ)	0,11—0,16	10,0—12,0	0,8—1,1	0,9—1,25	0,9—1,4	—	0,2—0,4
Э-06Х13Н	ЦЛ-41 (Св-06Х14)	⩽ 0,08	12—13	1,0—1,5	—	—	0,3—0,6	—

Тип электрода по ГОСТ 10052—75	Марка электрода (марка электродного стержня по ГОСТ 2246—70)	Режим термической обработки	Механические свойства при 20°С					Длительные испытания	
			$\sigma_{0,2}$, кгс/мм²	$\sigma_в$, кгс/мм²	δ, %	ψ, %	$a_н$, кгс·м/см²	Температура, °С	Длительная прочность за 10^5 ч, кгс/мм²
Э-12Х13	УОНИ-13/1Х13 (Св-12Х13)	760°С, 4 ч	⩾ 58	⩾ 86	⩾ 14	⩾ 54	⩾ 6	480—600	≈ 16,0—17
Э-12Х11НМФ	КТИ-9 (Св-12Х11НМФ)	730°С, 5 ч	⩾ 60	⩾ 75	⩾ 15	⩾ 56	⩾ 5	550	≈ 15,0
Э-12Х11НВМФ	КТИ-10 (Св-10Х11НВМФ)	730°С, 5 ч	⩾ 60	⩾ 75	⩾ 15	⩾ 55	⩾ 5	580	12,0—13,0
Э-14Х11НВМФ	ЦЛ-32 (Св-10Х11НВМФ)	730 °С, 7 ч	⩾ 60	⩾ 75	⩾ 12	⩾ 40	⩾ 4	600	≈ 12
Э-06Х13Н	ЦЛ-41 (Св-06Х14)	950°С, + 670°С	⩾ 60	⩾ 75	⩾ 17	⩾ 60	⩾ 6	—	—

8. Химический состав наплавленного металла и свойства сварных соединений жаропрочной высокохромистой стали после сварки в углекислом газе и термической обработки

Марка и состояние свариваемой стали	Марка электродной проволоки	Примерный химический состав наплавленного металла, %									Режим термической обработки	Температура испытания, °С	Механические свойства металла швов					Длительная прочность при 600 °С за 10^5 ч, кгс/мм²	
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	Nb			$\sigma_{0,2}$, кгс/мм²	$\sigma_в$, кгс/мм²	δ, %	ψ, %	$a_н$, кгс·м/см²	металла швов	сварного соединения
15Х11МФБ (поковки)	Св-15Х12НМВФБ (ЭП-249)	0,15	0,7	0,2	11,0	0,75	0,55	0,50	0,25	0,15	720°С, 2 ч 750°С, 5 ч 750°С, 5 ч	20 20 600	83 62,5 48,5	97 77 57	12 17 11	39 52 52	3,5 4,2 10,2	— — 11,0	— — 9,0
	Св-15Х12ГНМВФ (ЭП-390)	0,12	0,7	0,2	11,0	0,75	0,7	0,7	0,25	—	750 °С, 5 ч	20 600	60,4 30,7	71,6 52,0	19,9 22	53 71	7,3 14,6	10,0	9,0
15Х11МФБ (отливки, заварка раковин)	Св-15Х12ГНМВФ (ЭП-390)										1090°С, 10 ч* +1050°С, 8 ч, +730°С, 3 ч	20	62	77	19	57	7,7	11,0	—

* Режим двойной нормализации (с охлаждением после выдержки при высокой температуре на воздухе) и последующего отпуска.

9. Химический состав швов, выполненных под флюсом АН-26, и свойства сварных соединений коррозионно-стойких сталей, содержащих 13 и 17% Cr

Марка свариваемой стали	Марка электродной проволоки	Химический состав металла сварных швов, %								Термическая обработка после сварки	Механические свойства соединений				
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Ti	S	P		$\sigma_{0,2}$, кгс/мм²	$\sigma_в$, кгс/мм²	δ, %	ψ, %	$a_н$, кгс·м/см²
08Х13	Св-12Х13	0,09	0,50	0,35	12,9	0,40	—	0,02	0,02	Без термической обработки	92,0	106,0	9,0	17,0	3,4
										Отпуск 700°С, 3 ч	55,0	67,0	18,0	52,0	9,6
	Св-07Х25Н13	0,08	0,45	0,48	17,4	7,4	—	0,02	0,02	Без термической обработки	32,3	67,0	29,6	34,0	8,8
20Х13	Св-08Х14Т	0,09	0,32	0,45	12,7	0,44	0,14	0,02	0,02	Отпуск 700 °С, 3 ч	58,0	73,5	18,0	44,0	6,6
	Св-07Х25Н13	0,09	0,51	0,52	17,7	7,1	—	0,02	0,02	То же	34,2	70,2	21,5	37,6	8,1

10. **Химический состав швов при автоматической сварке под флюсом стали марки 1Х12В2МФ и их механические свойства после термической обработки при 750°С, 5 ч**

Марка электродной проволоки	Марка флюса	Металл	Химический состав металла, %									Температура испытания, °С	Механические свойства					Длительная прочность при 600 °С, кгс/мм²
			C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	Nb		$\sigma_{0,2}$ кгс/мм²	$\sigma_в$ кгс/мм²	δ %	ψ %	$a_н$, кгс·м/см²	
15Х12НМФБ (ЭП-249)	—	Проволока	0,13—0,18	0,9—1,3	0,3—0,6	11,0—12,5	0,9—1,3	0,7—1,1	0,8—1,2	0,2—0,4	0,15—0,20	20						≈ 11,0
	АН-17	Шов	0,12	0,79	0,25	10,34	0,70	0,85	1,18	0,37	0,09	20	60,0	78,5	18,1	44,7	5,5	
												600	41,3	47,3	20,0	69,4	17,0	
	48-ОФ-6	Шов	0,15	0,87	0,53	11,23	0,67	0,83	1,12	0,40	0,11	20	71,7	86,0	14,7	42,6	5,8	≈ 11,0
												600	48,6	51,3	17,6	66,6	13,7	
15Х12ГНМВФ (ЭП-390)	—	Проволока	0,12—0,17	0,9—1,3	0,6	11,0—12,5	0,6—0,9	0,8—1,2	—	0,25—0,45	—	20	58,8	74,0	18,4	60,5	7,8	≈ 8,0
	АН-17	Шов	0,11	0,71	0,23	10,0	0,89	0,75	1,12	0,30	—	600	39,2	42,2	19,3	74,9	16,0	
	48-ОФ-6		0,16	0,88	0,30	11,0	0,93	0,89	0,87	0,37	—	20	71,8	84,3	14,6	47,5	7,1	≈ 10,0
												600	40,5	42,5	19,4	75,8	17,5	

Виды сварки (в основном ручная, дуговая покрытыми электродами), обеспечивающие получение наплавленного металла с аустенитной или аустенитно-ферритной структурой, применяемые для получения соединений хромистых сталей мартенситного и мартенситно-ферритного класса, как правило, не обеспечивают равнопрочности сварных соединений и могут быть рекомендованы только для условий работы при статической нагрузке с небольшими напряжениями.

СВАРКА ВЫСОКОХРОМИСТЫХ ФЕРРИТНЫХ СТАЛЕЙ

К ферритным высокохромистым относятся стали с 13% Cr при очень низком содержании углерода (например, на нижнем уровне содержания углерода в стали 08Х13), некоторые низкоуглеродистые стали с 17% Cr и добавками титана, а также молибдена (стали — 12Х17, 08Х17Т, 15Х18СЮ, опытные типа Х17М2Т, а также с 25—30% Cr (например, сталь 15Х25Т). Общей характеристикой для этих сталей является их склонность к росту зерен при высокотемпературной обработке, в том числе и в результате сварочного нагрева в околошовной зоне и в металле швов (при составе швов, аналогичном составу ферритных сталей). При крупном зерне такие стали теряют пластичность и вязкость при комнатных (и более низких) температурах. Изменение ударной вязкости в зависимости от температуры испытания стали 08Х17Т и металла околошовной зоны этой стали при автоматической сварке под флюсом приведено на рис. 12 [1]. При этом вакуумный и электрошлаковый переплавы высокохромистых сталей позволяют (в связи с уменьшением содержания газов и неметаллических включений) повысить ударную вязкость основного металла, но не исключают понижения вязкости околошовных зон сварных соединений.

При отсутствии в сталях титана или при малом его количестве $\left(\frac{\mathrm{Ti}}{\mathrm{C}+\frac{6}{7}\mathrm{N}}<7\right)$ их нагрев выше 950° С и быстрое охлаждение приводят к ухудшению общей коррозионной стойкости и появлению склонности к межкристаллитной коррозии. Отпуск при 760—780° С повышает пластичность и коррозионную стойкость металла и сварных соединений.

Для максимального ограничения роста зерен при сварке предпочтительны способы сварки с сосредоточенными источниками тепла (например, дуговая сварка предпочтительней газовой) и при использовании малой погонной энергии. Наиболее распространенными являются ручная дуговая сварка покрытыми электродами и механизированная сварка в углекислом газе и под флюсом. При малых толщинах иногда применяют аргонодуговую сварку неплавящимся электродом.

При ручной дуговой сварке и сварке в CO_2 применяют электроды (электродные проволоки), обеспечивающие получение металла шва, по составу подобного свариваемому металлу, или металла шва с аустенитной или аустенитно-ферритной структурой, иногда с большим содержанием ферритной составляющей. В первом случае хрупкость, связанная с крупным зерном, представляет опасность не только для околошовной зоны, но и для металла сварного шва. В некоторой степени она может быть

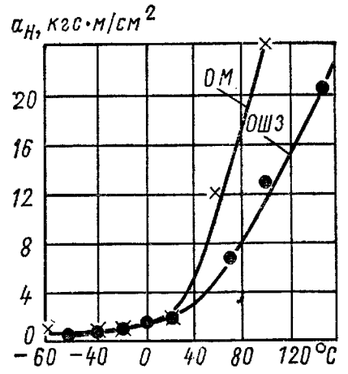


Рис. 12. Зависимость ударной вязкости стали 08Х17Т толщиной 10 мм (ОМ) и металла околошовной зоны у линии сплавления (ОШЗ) ее сварных соединений от температуры испытания

уменьшена, если применять сварочные материалы, обеспечивающие состав металла швов, который при сварочных скоростях охлаждения позволяет получать не чисто ферритную структуру, а структуру с некоторым содержанием мартенситной составляющей. Это возможно при сварке сталей, содержащих Cr ≤ 18%, путем введения в металл шва углерода, азота, никеля и марганца. В зависимости от свойства закаленного при сварке металла шва выбирают режим последующей термической обработки. Однако появление такой гетерогенной структуры снижает коррозионную стойкость сварных соединений в некоторых химически агрессивных средах.

Аустенитно-ферритные швы получают, используя сварочные материалы, обеспечивающие получение хромоникелевого или хромоникелевомарганцевого металла. При этом необходимо учитывать и разбавление в шве наплавленного металла расплавленным основным. Так как при автоматической сварке под флюсом доля расплавленного основного металла в шве как правило, больше, чем при ручной дуговой сварке покрытыми электродами, количество аустенизаторов в электродной проволоке при автоматической сварке должно быть больше, чем в электродах для ручной сварки. Например, при ручной сварке можно применять электроды со стержнями типа Х25Н13 (например, Св-07Х25Н13 по ГОСТ 2246—70), а при автоматической сварке — электродные проволоки типа Х25Н18 (например, Св-13Х25Н18). При этом приходится учитывать, что в некоторых агрессивных средах коррозионная стойкость соединений хромистых сталей с хромоникелевыми швами может оказаться ниже стойкости основного металла. Последующая термическая обработка таких сварных соединений (высокий отпуск при 650—800° С) не всегда является благоприятной для улучшения их эксплуатационных характеристик. Когда по условиям эксплуатации сварных соединений допустима невысокая пластичность, для исключения возможности появления при сварке трещин (особенно при достаточно большей жесткости свариваемого изделия) применяют предварительный и сопутствующий подогрев при 120—180° С и последующую термическую обработку.

Для сварки высокохромистых ферритных сталей с получением наплавленного металла такого же типа применяют электроды с покрытиями основного типа, с большим количеством ферротитана и алюминия. Наиболее распространенными являются электроды марок ЦЛ-10 и НЗЛ/Ж17 для сварки сталей с 17% Cr и электроды марок НЗЛ/Х30 для сварки сталей с 25—30% Cr. Химический состав металла наплавленного такими электродами, приведен в табл. 11. Там же приведены составы наплавленного металла хромоникелевыми электродами, используемыми для сварки ферритных и хромистых сталей.

Механические свойства металла, наплавленного электродами различных марок приведены в табл. 12. При использовании электродов из высокохромистых сталей эти свойства определяют и свойства сварных соединений из сталей подобного состава. При использовании хромоникелевых электродов, из-за отличия химического состава наплавленного металла от химического состава свариваемых хромистых сталей, свойства металла шва значительно отличаются от свойств наплавленного металла. Поэтому в табл. 12 приведены свойства наплавленного металла и свойства сварных соединений стали 12Х17Т толщиной 10 мм, сваренных электродами ЦЛ-9 [2].

При механизированных процессах сварки ферритных хромистых сталей (сварка в CO_2, а также сварка под флюсом) с использованием сварочных материалов, обеспечивающих получение швов с ферритной структурой, даже последующий высокий отпуск не повышает вязкости швов, хотя такой отпуск несколько улучшает коррозионные характеристики сварных соединений сталей типа 08Х17Т. Более распространенными являются электродные проволоки из хромоникелевых сталей, относящиеся к аустенитному и аустенитно-ферритному классам. При этом для обеспечения коррозионной стойкости, например в азотной и уксусной кислотах, сопоставимой со стойкостью основного металла, в швах должны содержаться титан и ниобий. Так, для сварки стали 08Х17Т в углекислом газе удовлетворительные результаты могут быть получены при электродных проволоках

11. Состав наплавленного металла при ручной дуговой сварке покрытыми электродами хромистых ферритных сталей

Тип электрода	Марка электрода	Электродный стержень	Химический состав, %					
			C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti
Э-10Х17Т	ЦЛ-10	Св-10Х17Т	0,08	0,3—0,5	0,5—0,8	16,0—18,0	0,25	0,08—0,20
	УОНИ/10Х17Т	Св-10Х17Т	0,11	0,5	0,55	15,0—17,0	0,4—0,6	0,08—0,20
	НЗЛ-Х17	Св-10Х17Т	0,12	0,4	0,5	15,0—17,0	—	0,08—0,20
	НЗЛ/Х30	Типа 10Х29Т	0,07	0,5	0,3	30,0	0,25	≈ 0,25
Э-10Х25Н13Г2Б	ЦЛ-9	Св-07Х25Н13	0,10	0,4—1,1	1,2—2,0	22,0—24,0	11—13,5	≈ 0,8 Nb
	ЗИО-7	Св-07Х25Н13	0,08	0,7	1,4	22—24	11,5—14,0	0,8 Nb
	ЦЛ-8	Св-13Х25Н18	0,12	0,4—0,6	1,2—1,8	23,0—26,0	18—21	—

12. Механические свойства наплавленного металла и сварных соединений при ручной дуговой сварке покрытыми электродами ферритных высокохромистых сталей

Марка электрода	Состояние испытуемого металла	Механические свойства				
		$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$	δ	ψ	$a_н$, кгс·м/см²	Угол загиба, град
		кгс/мм²		%			
ЦЛ-10	Исходное после сварки	64,0	72,0	Хрупкий излом		6,0	—
	После отпуска при 650 °С	46,0	65,0	18	48	8,0	—
НЗЛ/Х30	Исходное после сварки	—	55—58	—	—	—	10—15
	После нагрева при 800 °С и охлаждения на воздухе	—	56—59	—	—	—	40—45
ЦЛ-9	Исходное после сварки	Наплавленный металл	38,0	68	39	55	9,0	—
		Сварное соединение стали 1Х17Т*²	41,3	69,0	41,9	42	9,4*¹ / 1,6	90—100

*¹ В числителе — металл шва, в знаменателе — металл околошовной зоны.
*² Механические свойства при сварке стали 15Х25Т электродами марки ЦЛ-9 практически такие же.

марок Св-08Х20Н9Г7Т или Св-05Х25Н12ТЮ [2]. Наиболее хорошее качество сварных соединений было получено при использовании проволоки типа Св-08Х20Н15ФБЮ. Химический состав металла швов при сварке такой проволокой стали 08Х17Т толщиной 10 мм приведен в табл. 13, а механические свойства металла швов и сварных соединений — в табл. 14 [2].

13. Химический состав электродной проволоки и металла швов при механизированных методах сварки стали 08Х17Т

Электродная проволока, швы	Химический состав, %							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	V	Nb	Al
Проволока 08Х20Н15ФБЮ	0,08	1,63	0,42	20,1	14,5	0,87	1,15	0,42
Металл шва (сварка под флюсом АН-26)	0,08	1,10	0,86	18,6	8,3	0,70	0,45	0,06
Металл шва (сварка в CO_2)	0,09	0,95	0,32	18,5	8,9	0,68	0,49	Следы

14. Механические свойства металла швов и соединений ферритных высокохромистых сталей толщиной 10 мм, выполненных сваркой в углекислом газе

Марка свариваемой стали	Марка электродной проволоки	Режим термической обработки	Механические свойства металла швов при 20 °С					Угол загиба, град
			$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$	δ	ψ	$a_н$, кгс·м/см²	
			кгс/мм²		%			
12Х17	Св-10Х17Т	730 °С, 3 ч	33,0	54,0	24	55	0,6	88
	Св-13Х25Н18		28,7	58,6	40	42	8,2	107
08Х17Т	Св-13Х25Н18	Без термической обработки	31,3	57,2	40	42	7,0	62
	Св-05Х25Н12ТЮ		35,0	70,0	30	50	9,0	150
	Св-08Х20Н15ФБЮ (ЭП-444)		32,6	67,0	40	48	10,1	170
15Х25Т	Св-05Х25Н12ТЮ		50,0	70,0	23	42	8,2	100
	Св-13Х25Н18		42.0	65,0	36	45	10,9	180

Коррозионная стойкость сварных соединений в азотной кислоте различной концентрации сопоставима со стойкостью стали 08Х17Т [2].

Для сварки сталей, содержащих Cr $\geqslant$ 25%, используемых в основном как жаростойкие (окалиностойкие), в сварных швах должна обеспечиваться примерно такая же концентрация хрома. При механизированных процессах, как правило, в швах стремятся получить хромоникелевые аустенитно-ферритные или ферритно-аустенитные структуры.

Составы металла швов при автоматической сварке под флюсом и ручной сварке, а также характеристики структуры швов приведены в табл. 15.

Механические свойства соединений, сваренных приведенными сварочными материалами (кроме ударной вязкости околошовной зоны), отвечают свойствам основного металла. Швы, выполненные автоматической сваркой электродной

проволокой Св-13Х25Н18 (а также и ручной сваркой электродами со стержнями из этой проволоки, например ЦЛ-8), оказываются склонными к межкристаллитной коррозии, определяемой повышенным содержанием углерода и отсутствием стабилизирующих элементов.

15. Химический состав швов, выполненных при сварке стали 15Х25Т различными материалами

Способ сварки, сварочные материалы	Химический состав, %						Микроструктура металла шва
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Ti	
Автоматическая сварка под флюсом, флюс АН-26, проволока:							Ферритно-аустенитная, феррита:
Св-07Х25Н13	0,08	0,70	1,10	24,0	6,6	0,12	50%
Св-0Х25Н12ТЮ	0,08	1,08	1,05	24,0	6,5	0,30	55%
Св-13Х25Н18	0,11	0,88	0,52	24,0	8,6	0,13	Аустенитно-ферритная, феррита 30%
Ручная сварка электродами ЦЛ-9	0,09	1,2	0,7	24,3	0,8	0,1 0,8 Nb	

При выборе сварочных материалов для сварки ферритных высокохромистых сталей необходимо учитывать возможное отрицательное проявление никеля в швах (например, при изготовлении аппаратуры из стали 08Х17Т для каталитического гидрирования бутана(или аустенитно-ферритных швов в аппаратуре, работающей с теплосменами). В последнем случае заметное различие коэффициентов теплового расширения основного металла и швов приводит к накоплению локальных деформаций после каждого цикла нагрева и охлаждения. Однако крупногабаритные сварные изделия из высокохромистых сталей часто изготовляют из хромоникелевых ферритно-аустенитных сталей, имеющих ~50% ферритной составляющей в структуре.

Список литературы

1. **Каховский Н. И.** Сварка высоколегированных сталей. Киев, «Техника», 1968. 375 с.

2. **Каховский Н. И., Фартушный В. Г., Ющенко К. А.** Справочник. Электродуговая сварка сталей. Киев, «Наукова думка», 1975. 480 с.

3. **Петров Г. Л.** Сварка высокохромистых мартенситных, мартенситно-ферритных и ферритных сталей. Справочник по сварке. Т. IV. Под ред. А. И. Акулова, М., «Машиностроение», 1971. 415 с.

4. **Петров Г. Л., Земзин В. Н., Гонсеровский Г. Ф.** Сварка жаропрочных нержавеющих сталей. М. — Л., Машгиз, 1963. 248 с.

5. **Рабочие** колеса из нержавеющей стали для мощных гидротурбин. ЦНИИТМАШ, № 64—65, М., ОНТИ, 1966. 132 с.

Глава 9

СВАРКА АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА И КЛАССИФИКАЦИЯ

Существующие аустенитные высоколегированные стали и сплавы различают по содержанию основных легирующих элементов — хрома и никеля и по составу основы сплава. Высоколегированными аустенитными сталями считают сплавы на основе железа, легированные различными элементами в количестве до 55%, в которых содержание основных легирующих элементов — хрома и никеля обычно не выше 15 и 7% соответственно. К аустенитным сплавам относят железоникелевые сплавы с содержанием железа и никеля более 65% при отношении никеля к железу 1 : 1,5 и никелевые сплавы с содержанием никеля не менее 55% (см. гл. 12).

Аустенитные стали и сплавы классифицируют по системе легирования, структурному классу, свойствам и служебному назначению. Высоколегированные стали и сплавы являются важнейшими материалами, широко применяемыми в химическом, нефтяном, энергетическом машиностроении и других отраслях промышленности для изготовления конструкций, работающих в широком диапазоне температур. Благодаря высоким механическим свойствам при отрицательных температурах высоколегированные стали и сплавы применяют в ряде случаев и как хладостойкие. Соответствующий подбор легирующих элементов определяет свойства и основное служебное назначение этих сталей и сплавов (табл. 1—3).

Характерным отличием коррозионно-стойких сталей является пониженное содержание углерода (не более 0,12%). При соответствующем легировании и термической обработке стали обладают высокой коррозионной стойкостью при 20° С и повышенной температуре как в газовой среде, так и в водных растворах кислот, щелочей и в жидкометаллических средах.

К жаропрочным относятся стали и сплавы, обладающие высокими механическими свойствами при повышенных температурах и способностью выдерживать нагрузки при нагреве в течение длительного времени. Для придания этих свойств стали и сплавы легируют элементами-упрочнителями — молибденом и вольфрамом (до 7% каждого). Важной легирующей присадкой, вводимой в некоторые стали и сплавы, является бор, способствующий измельчению зерна.

Жаростойкие стали и сплавы обладают стойкостью против химического разрушения поверхности в газовых средах при температурах до 1100—1150° С. Обычно их используют для слабонагруженных деталей (нагревательные элементы, печная арматура, газопроводные системы и т. д.). Высокая окалиностойкость этих сталей и сплавов достигается легированием алюминием (до 2,5%) и кремнием, способствующими созданию прочных и плотных окислов на поверхности деталей, предохраняющих металл от контакта с газовой средой.

По системе легирования аустенитные стали делятся на два основных типа: хромоникелевые и хромомарганцевые. Существуют также хромоникельмолибденовые и хромоникельмарганцевые стали.

В зависимости от основной структуры, получаемой при охлаждении на воздухе, различают следующие классы аустенитных сталей: аустенитно-мартенситные, аустенитно-ферритные, аустенитные.

Сплавы на железоникелевой (при содержании никеля более 30%) и никелевой основах по структуре являются стабильноаустенитными и не имеют структурных превращений при охлаждении на воздухе. В настоящее время находят

1. Состав некоторых коррозионно-стойких аустенитных сталей и сплавов, %

Материал	C	Cr	Ni	Ti	Si	Mn	S	P	Прочие элементы	Дополнительное использование
							не более			
Аустенитно-мартенситные стали										
07Х16Н6 (Х16Н6, ЭП288)	0,05—0,09	15,5—17,5	5,0—8,0	—	≤0,8	≤0,8	0,020	0,035	—	Применяются как высокопрочные материалы при температурах до 500—550 °С. Изделия, работающие преимущественно в атмосферных условиях, слабых кислотах и в ряде органических веществ и солей
Х15Н8М2Ю (ЭП35)	0,05—0,10	14,2—15,8	7,0—8,5	—	0,70	0,70	0,020	0,030	1,20—1,80 Al; 1,6—2,40 Mo	
09Х17Н7Ю (0Х17Н7Ю, ЭИ973)	0,09	16,0—18,0	6,5—7,5	—	0,80	0,80	0,020	0,030	0,50—0,80 Al	
Аустенитно-ферритные стали										
08Х22Н6Т (0Х22Н5Т, ЭП53)	≤0,08	21,0—23,0	5,30—6,30	5 С — 0,65	≤0,80	≤0,80	0,025	0,035	—	—
08Х21Н6М2Т (0Х21Н6М2Т, ЭП54)	≤0,08	20,0—22,0	5,5—6,5	0,2—0,4	≤0,80	≤0,80	0,025	0,035	1,8—2,5 Mo	—
Х28АН (ЭИ657)	0,15	25,0—28,0	1,0—1,7	—	1,00	1,50	0,025	0,035	0,18—0,25 N	Применяется и как жаростойкий материал
08Х20Н14С2 (0Х20Н14С2, ЭИ732)	≤0,08	19,0—22,0	12,0—15,0	—	2,00—3,00	≤1,50	0,025	0,035	—	
Аустенитные стали и сплавы										
08Х18Н10 (0Х18Н10)	≤0,08	17,0—19,0	9,0—11,0		≤0,80	≤2,00	0,020	0,035	—	Применяется и как жаростойкий материал
12Х18Н10Т* (Х18Н10Т)	≤0,12	17,0—19,0	9,0—11,0	5С—0,70	≤0,80	1,00—2,00	0,020	0,035	—	Применяется и как жаропрочный материал
08Х18Н12Т* (0Х18Н12Т)	≤0,08	17,0—19,0	11,0—13,0	5С—0,60	≤0,80	≤2,00	0,020	0,035	—	То же
10Х17Н13М2Т (Х17Н13М2Т, ЭИ448)	≤0,10	16,0—18,0	12,0—14,0	5С—0,70	≤0,80	≤2,00	0,020	0,035	2,0—3,0 Mo	—
10Х23Н18 (0Х23Н18)	≤0,10	22,0—25,0	17,0—20,0	—	≤1,00	≤2,00	0,020	0,035	—	Применяется и как жаростойкий материал
06ХН28МДТ, 0Х23Н28М3Д3Т (ЭИ943)	≤0,06	22,0—25,0	26,0—29,0	0,50—0,90	≤0,80	≤0,80	0,020	0,035	2,5—3,0 Mo; 2,5—3,5 Cu	—
ХН65МВ, 0Х15Н65М16В (ЭП567)	0,03	14,4—16,5	Основа	—	≤0,15	≤1,00	0,020	0,020	15,0—17,0 Mo; ≤1,0 Fe; 3,0—4,5 W	Применяется также для изготовления сварочной проволоки

* Содержание титана зависит от содержания углерода.

3. Состав некоторых жаростойких аустенитных сталей и сплавов, %

Материал	Cr	Ni	Ti	C	Si	Mn	S (не более)	P (не более)	Прочие элементы	Дополнительное использование
Аустенитные стали										
36Х18Н25С (4Х18Н25С2)	17—19	23—26	—	0,32—0,40	2,0—3,0	< 1,5	0,020	0,035	—	Литые муфели печей
20Х23Н18 (Х23Н18, ЭИ417)	22—25	17—20	—	0,20	⩽1,0	⩽2,0	0,020	0,035	—	—
20Х25Н20С2 (Х25Н20С2, ЭИ283)	24—27	18—21	—	< 0,20	2,0—3,0	⩽1,5	0,020	0,035	—	Литые муфели печей
45Х15Г15СЮ	14—16	До 0,5	—	0,4—0,5	1,2—1,8	13—15	0,030	0,040	1,2—1,8 Al	—
12Х25Н16Г7АР (Х25Н16Г7АР, ЭИ835)	23—26	15—18	—	< 0,12	< 1,0	5—7	0,020	0,035	0,3—0,45 N; до 0,02 B	—
Х25Н20С2Л (25-20Л)	23—26	24—27	—	0,18	0,8—2,0	0,7—1,5	0,030	0,035	—	В виде отливок
1Х25Н25ТР (ЭИ813)	23—26	24—27	1,1—1,6	0,07—0,12	⩽0,8	1,0—2,0	0,020	0,035	До 0,01 B	—
45Х15Г14Ю (ЭП499)	14—16	До 0,5	—	0,4—0,5	⩽0,6	13—15	0,030	0,040	1,2—1,8 Al	—
45Х15Г14СЮ (ЭП577)	14—16	До 0,5	—	0,4—0,5	1,2—1,8	13—15	0,030	0,040	1,2—1,8 Al	—
Аустенитно-ферритные стали										
20Х23Н13 (Х23Н13, ЭИ319)	22—25	12—15	—	< 0,2	< 1,0	< 2,0	0,025	0,035	—	—
20Х20Н14С2	19—22	12—15	—	< 0,2	2,0—3,0	< 1,5	0,025	0,035	—	—
(Х20Н14С2, ЭИ211) Х25Н13ТЛ	23,5—26,5	12—14	0,1—0,18	0,14—0,20	⩽0,6	1,0—1,5	0,025	0,035	0,1—0,16 N	В виде отливок
08Х20Н14С2 (0Х20Н14С2, ЭИ732)	19—22	12—15	—	0,08	2—3	⩽1,5	0,025	0,035	0,1—0,16	—
22-11-2,5	20—23	10,5—12,5	До 0,2	0,1—0,52	0,6—1,5	0,6—1,2	0,040	0,045	2,4—3,0 W; 0,2 V; 0,25 Mo	—
Аустенитные сплавы										
							0,020	0,030	2,8—3,5 W;	—

Материал	Cr	Ni	Ti	C	Si	Mn	S	P	Прочие элементы	Дополнительное использование
09Х14Н19В2БР (1Х14Н18В2БР, ЭИ695Р)	0,07—0,12	13,0—15,0	18,0—20,0	—	⩽0,60	⩽2,00	0,020	0,035	2,0—2,75 W; 0,90—1,3 Nb; ⩽ 0,005 B; ⩽ 0,020 Ce	Паропроводные трубы
1Х15Н18В4Т (ЭП501)	0,07—0,12	14,0—16,0	18,0—20	1,10—1,60	⩽0,50	0,50—1,00	0,020	0,020	4,0—5,0 W; 0,002—0,005 B; 0,025 Ce (по расчету)	—
1Х16Н9В4Б (ЦЖ15)	0,08—0,12	15,0—16,5	8,5—10,0	—	⩽0,60	1,00—1,50	0,030	0,035	3,0—4,0 W; 8(%C)—1,2 Nb	Литые детали турбин
12Х18Н12Т (Х18Н12Т)	< 0,12	17,0—19,0	11,0—13,0	5C—0,7	< 0,8	< 2,0	0,020	0,035	—	Трубы, поковки, лист
Х16Н9М2	0,08	15,5—17,0	8,5—10,0	—	⩽0,60	1,0—1,5	—	—		То же
1Х14Н14В2М (ЭИ257)	0,15	13,0—15,0	13,0—16,0	—	⩽0,80	⩽0,70	—	—		Трубы, поковки
08Х16Н13М2Б (1Х16Н13М2Б, ЭИ680)	0,06—0,12	15,0—17,0	12,5—14,5	—	⩽0,80	⩽1,00			0,9—1,3 Nb	Поковки
31Х19Н9МВБТ (3Х19Н9МВБТ, ЭИ572)	0,28—0,35	18,0—20,0	8,0—10,0	0,20—0,5	0,3—0,8	0,75—1,50	0,020	0,035	0,2—0,5 Nb	»
1Х16Н14В2БР (ЭП17)	0,07—0,12	15,0—18,0	13,0—15,0	—	⩽0.60	1,0—2,0	—	—	0,9—1,3 Nb 0,005 B	Трубы, поковки
1Х16Н16МВ2БР (ЭП184)	0,06—0,11	15,0—17,0	15,0—17,0	—	⩽0,80	⩽0,60	—	—	0,6—0,9 Nb 0,005 B	Трубы
1Х20Н12Т-Л	0,08—0,12	19,0—21,0	11,0—13,0	5(%C—0,02) ⩽ 0,7	⩽0,95	1,0—2,0	—	—	—	Литая арматура паровых и газовых турбин
1Х17Н10Г4МБ (ЭИ402М)	0,12	16,0—18,0	9,5—11,0	—	⩽0,60	3,5—4,5	—	—	0,7—1,0 Nb	То же
1Х16Н9В4Б (ЦЖ15)	0,08—0,12	15,0—16,5	8,5—10,0	—	⩽0,60	1,0—1,5	—	—	8C, но не более 1,2	»
1Х15Н25М6А (ЭИ395)	0,12	15,0—17,5	24,0—27,0	—	0,5—0,1	1,0—2,0	—	—	0,10—0,20 Nb	Поковки
Х15Н35ВТ (ЭИ612)	0,12	14,0—16,0	34,0—38,0	1,1—1,5	0,50	1,0—2,0	—	—	—	»
Х15Н35ВТР (ЭИ725)	0,12	14,0—16,0	35,0—38,0	1,1—1,5	0,60	1,0	—	—	0,005—0,02 B	Лист

применение также аустенитно-боридные Х15Н15М2БР1 (ЭП380), Х25Н20С2Р1 (ЭП532), ХН77СР1 (ЭП615) и высокохромистые аустенитные ХН35ВЮ (ЭП568), ХН50 (ЭП668) стали и сплавы, основная структура которых содержит аустенит и боридную или хромоникелевую эвтектические фазы соответственно.

После соответствующей термической обработки высоколегированные стали и сплавы обладают высокими прочностными и пластическими свойствами (табл. 4). В отличие от углеродистых эти стали при закалке приобретают повышенные пластические свойства. Структуры высоколегированных сталей разнообразны и зависят не только от их состава, но и от режимов термической обработки, степени пластической деформации и других факторов.

4. Типовые механические свойства некоторых марок высоколегированных аустенитных и аустенитно-ферритных сталей и сплавов

Материал	Термическая обработка	$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ, %
		кгс/мм²		
08Х18Н10	Закалка 1050—1100 °С, охлаждение на воздухе, в масле или воде	48	20	40
12Х18Н12Т		55	20	40
10Х17Н13М2Т		52	22	40
08Х18Н12Б		50	18	40
10Х14Г14Н4Т	Закалка 1000—1080°С, охлаждение на воздухе, в масле или воде	65	25	35
08Х21Н5Т	Закалка 950—1050 °С, охлаждение на воздухе	55	35	25
08Х21Н6М2Т	Закалка 1000—1080 °С, охлаждение на воздухе	70	45	25
09Х17Н7Ю	Закалка 1030—1070 °С, охлаждение на воздухе; первый отпуск 740—760 °С, повторный 550—600°С, охлаждение на воздухе	35	70	10
20Х23Н18	Закалка 1100—1150 °С, охлаждение на воздухе, в масле или воде	50	20	35
20Х25Н20С2		60	30	35
ХН78Т	Закалка 980—1020 °С на воздухе или в воде	70	—	27,5
ХН67МВТЮ	Закалка 1200 °С на воздухе, старение при 850°С, 15 ч	100—110	55—75	20—30

Положение фазовых областей на диаграммах состояния определено в основном в виде псевдобинарных разрезов систем железо — хром — никель или железо — хром — марганец (рис. 1). Железохромоникелевые сплавы непосредственно после затвердевания имеют твердые растворы видов α и γ и гетерогенную область смешанных твердых растворов $\alpha+\gamma$. Устойчивость аустенита определяется близостью состава к границе α- и γ-области. Неустойчивость может проявляться при нагреве до умеренных температур и последующем охлаждении, когда фиксированная быстрым охлаждением аустенитная структура частично переходит в мартенситную. Увеличение содержания никеля в этих сплавах способствует понижению температуры $\gamma \rightarrow \alpha$ (M) -превращения (рис. 2).

Неустойчивость проявляется при холодной деформации, когда стали типа 18-8 в зависимости от степени деформации изменяют свои магнитные и механические свойства (рис. 3). Кроме того, неустойчивость аустенитных сталей может вызываться выделением карбидов из твердого раствора при изменении температуры, сопровождающимся изменением концентрации углерода и хрома. Это вызывает нарушение равновесного состояния и превращение аустенита в феррит и мартенсит преимущественно по границам зерен, где наблюдается наибольшее обеднение хромом и углеродом твердого раствора.

В тройной системе железохромомарганцовистых сплавов после затвердевания образуется непрерывный ряд твердых растворов с γ-решеткой и в процессе дальнейшего охлаждения в зависимости от состава сплава происходят различные аллотропические превращения. Марганец относится к элементам, расширяющим γ-область, и в этом отношении аналогичен никелю. При достаточной концентрации марганца ($>15\%$) и хрома ($<15\%$) сталь может иметь однофазную аустенитную структуру. Сопоставление фазовых диаграмм систем железо—хром—никель и железо — хром — марганец при высоких температурах и 20° С показывает, что аустенитная фаза в системе с никелем имеет значительно большую площадь.

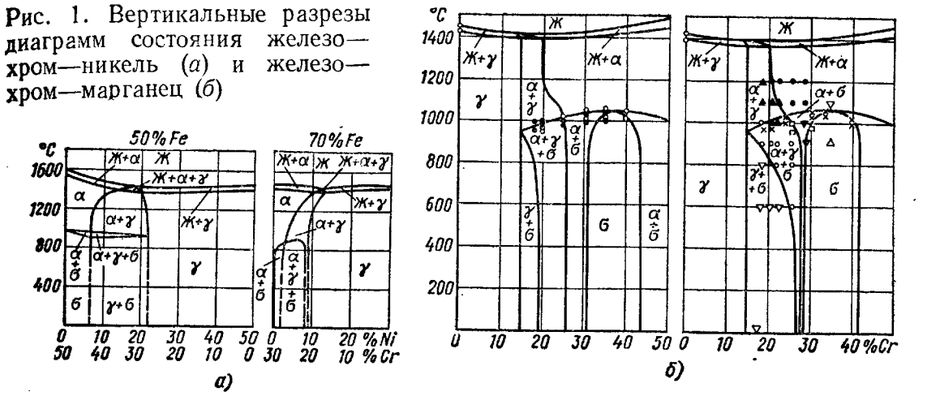


Рис. 1. Вертикальные разрезы диаграмм состояния железо—хром—никель (*а*) и железо—хром—марганец (*б*)

При кристаллизации хромоникелевых сталей из расплава начинают вначале выпадать кристаллы хромоникелевого феррита, имеющего решетку δ-железа (рис. 4). По мере охлаждения в δ-феррите образуются кристаллы хромоникелевого аустенита, имеющего решетку γ-железа, и сталь приобретает аустенитную

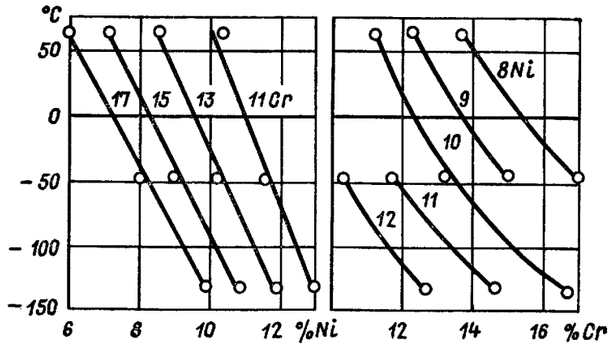


Рис. 2. Изменения температуры мартенситного превращения железохромоникелевых сплавов в зависимости от легирования

структуру. Углерод в аустенитно-ферритной и аустенитной сталях при температурах выше линии SE находится в твердом растворе и в виде фаз внедрения. Медленное охлаждение стали ниже линии SE приводит к выделению углерода из твердого раствора в виде химического соединения — карбидов хрома типа $Cr_{23}C_6$, располагающихся преимущественно по границам зерен. Дальнейшее охлаждение ниже линии SK способствует выпадению по границам зерен вторичного феррита. Таким образом, сталь при медленном охлаждении до 20° С имеет аустенитную структуру со вторичными карбидами и ферритом.

При быстром охлаждении (закалке) распад твердого раствора не успевает произойти, и аустенит фиксируется в пересыщенном и неустойчивом состояниях.

Количество выпавших карбидов хрома зависит не только от скорости охлаждения, но и от количества углерода в стали. При его содержании менее 0,02—0,03%, т. е. ниже предела его растворимости в аустените, весь углерод остается в твердом растворе. В некоторых композициях аустенитных сталей ускоренное охлаждение может привести к фиксации в структуре первичного δ-феррита, предупреждающего горячие трещины.

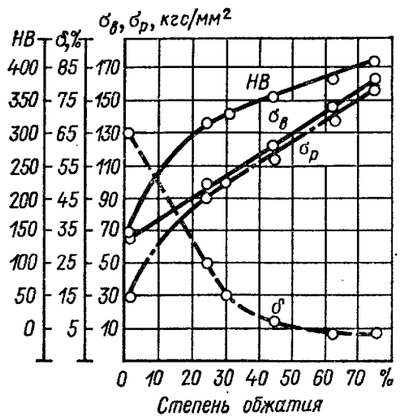


Рис. 3. Изменение механических свойств хромоникелевой стали (18% Cr, 8% Ni, 0,17% C) в зависимости от степени холодной деформации (обжатия)

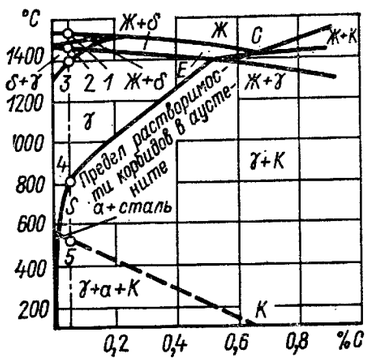


Рис. 4. Псевдобинарная диаграмма состояния в зависимости от содержания углерода для сплава 18% Cr, 8% Ni, 74% Fe

Изменение в стали содержания легирующих элементов влияет на положение фазовых областей. Хром, титан, ниобий, молибден, вольфрам, кремний, ванадий, являясь ферритизаторами, способствуют появлению в структуре стали ферритной составляющей. Никель, углерод, марганец и азот сохраняют аустенитную структуру. Однако основными легирующими элементами в рассматриваемых сталях являются хром и никель. В зависимости от их соотношения стали иногда разделяют на стали с малым $\left(\frac{\%Ni}{\%Cr} \leqslant 1\right)$ и большим $\left(\frac{\%Ni}{\%Cr} > 1\right)$ запасом аустенитности.

В аустенитных хромоникелевых сталях, легированных титаном и ниобием, образуются не только карбиды хрома, но и карбиды титана и ниобия. При содержании титана $Ti > [(\%C - 0{,}02) \times 5]$ или ниобия $Nb > (\%C \times 10)$ весь свободный углерод (выше предела его растворимости в аустените) может выделиться в виде карбидов титана или ниобия, а аустенитная сталь становится не склонной к межкристаллитной коррозии. Выпадение карбидов повышает прочностные и понижает пластические свойства сталей. Это свойство карбидов используют для карбидного упрочнения жаропрочных сталей, проводимого в комплексе с интерметаллидным упрочнением частицами Ni_3Ti; $Ni_3(Al, Ti)$, Fe_2W, $(N, Fe)_2$ Ti и др. К интерметаллидным соединениям относят и σ-фазу, которая образуется в хромоникелевых сталях при длительном нагреве или медленном охлаждении при температурах ниже 900—950° С. Она обладает ограниченной растворимостью в α- и γ-твердых растворах и, выделяясь преимущественно по границам зерен, упрочняет сплав и одновременно резко снижает пластические свойства и ударную вязкость металла. Повышенные концентрации в стали хрома (16—25%) и элементов-ферритизаторов (молибдена, кремния и др.) способствуют

образованию σ-фазы при 700—850° С. Выделение этой фазы происходит преимущественно с образованием промежуточной фазы феррита ($\gamma \rightarrow \alpha \rightarrow \sigma$) или преобразования δ-феррита ($\delta \rightarrow \sigma$). Однако возможно ее выделение и непосредственно из твердого раствора ($\gamma \rightarrow \sigma$).

В хромомарганцовистых сталях с высоким содержанием хрома и марганца при замедленном охлаждении также наблюдается выделение σ-фазы. Углерод в хромомарганцовистых и хромомарганцевоникелевых сталях приводит к дисперсионному твердению сталей после соответствующей термической обработки, особенно при совместном легировании с карбидообразующими элементами (ванадием, ниобием и вольфрамом).

Упрочнение аустенитно-боридных сталей происходит в основном за счет образования боридов железа, хрома, ниобия, углерода, молибдена и вольфрама. В соответствии с этими процессами аустенитные стали подразделяют в зависимости от вида упрочнения на карбидные, боридные и с интерметаллидным упрочнением. Однако в большинстве случаев в связи с содержанием в сталях и сплавах большого количества различных легирующих элементов их упрочнение происходит за счет комплексного влияния дисперсных фаз и интерметаллидных включений.

ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ

Основные трудности сварки рассматриваемых сталей и сплавов обусловлены многокомпонентностью их легирования и разнообразием условий эксплуатации сварных конструкций. Главной и общей особенностью сварки является склонность к образованию в шве и околошовной зоне горячих трещин, имеющих межкристаллитный характер. Они могут наблюдаться как в виде мельчайших микронадрывов, так и видимых трещин. Горячие трещины могут возникнуть и при термической обработке или работе конструкции при повышенных температурах. Образование горячих трещин связано с формированием при сварке крупнозернистой макроструктуры, особенно выраженной в многослойных швах, когда кристаллы последующего слоя продолжают кристаллы предыдущего слоя, и наличием напряжений усадки.

Металлу сварных швов свойственны ячеисто-дендритные формы кристаллизации, что приводит к образованию крупных столбчатых кристаллов и обогащению междендритных участков примесями, образующими легкоплавкие фазы. В аустенитных швах столбчатая структура выражена наиболее четко. Применение методов, способствующих измельчению кристаллов и устранению столбчатой структуры, повышает стойкость швов против образования горячих трещин. Одним из таких методов является получение швов, имеющих в структуре некоторое количество первичного δ-феррита. Положительное действие феррита в аустенитно-ферритных швах на предупреждение образования в них горячих трещин связано с изменением схемы кристаллизации и большей растворимостью в нем ликвирующих примесей. Одновременное выпадение из жидкой фазы кристаллов аустенита и первичного δ-феррита приводит к измельчению и дезориентации структуры, т. е. к уменьшению сечения столбчатых кристаллов, разделенных участками первичного δ-феррита. В результате вероятность образования горячих трещин по местам расположения жидких прослоек уменьшается. Получение аустенитно-ферритных швов достигается их дополнительным легированием ферритообразующими элементами, такими как хром, кремний, алюминий, молибден и др. В изделиях, работающих как коррозионно-стойкие при температурах до 400° С, допускается содержание феррита до 20—25%. В изделиях из жаропрочных и жаростойких сталей, работающих при более высоких температурах, с целью предупреждения сигматизации количество δ-феррита в швах ограничивают 4—5%.

В сталях с большим запасом аустенитности получение швов с аустенитно-ферритной структурой затруднено. Возможность предотвращения в них горячих трещин достигается ограничением содержания в швах примесей, образующих легкоплавкие эвтектики (фосфора, серы). Для этого применяют сварочные мате-

риалы, изготовленные из сталей вакуумной выплавки или электрошлакового переплава, и ограничивают проплавление основного металла. В некоторых случаях можно улучшить стойкость швов против горячих трещин повышением содержания ликвирующих примесей до концентраций, обеспечивающих получение на завершающих стадиях кристаллизации обильной эвтектики на поверхности кристаллитов, например при легировании стали бором (0,3—1,5%). При этом уменьшаются деформации, накапливаемые в металле шва к концу кристаллизации, вследствие понижения верхней температуры эффективного интервала кристаллизации. Снижение действия силового фактора (ограничением тока, заполнением разделки валиками небольшого сечения, рациональной конструкцией соединения и др.) также является фактором предупреждения горячих трещин.

Кроме сложности получения на аустенитных высоколегированных сталях и сплавах швов без горячих трещин, имеются и другие особенности сварки, обусловленные особенностями их использования. К сварным соединениям жаропрочных сталей предъявляется требование сохранения в течение длительного времени высоких механических свойств при повышенных температурах. Большие скорости охлаждения при сварке приводят к фиксации неравновесных структур в металле шва. В процессе эксплуатации при температурах выше 350° С в результате диффузионных процессов в стали появляются новые структурные составляющие, приводящие к снижению пластических свойств металла шва. Термическое старение при 350—500° С вызывает появление «475-градусной хрупкости», а при 500—650° С приводит к выпадению карбидов и одновременно к образованию σ-фазы. Выдержка при 700—850° С интенсифицирует образование σ-фазы с соответствующим сильным охрупчиванием металла при более низких температурах и снижением прочности при высоких температурах. При этом возрастает роль и интерметаллидного упрочнения. В процессах теплового старения аустенитных сталей ведущее место занимают процессы карбидного и интерметаллидного упрочнения, поэтому для уменьшения склонности сварных соединений жаростойких и жаропрочных сталей к охрупчиванию в результате выпадения карбидов эффективно снижать содержание углерода в основном металле и металле шва.

В околошовной зоне некоторых жаропрочных аустенитных сталей под действием термического цикла сварки снижаются пластические и прочностные свойства, что может повести к образованию в этой зоне трещин. Подобные изменения свойств основного металла вызываются развитием диффузионных процессов, приводящих к повышенной концентрации в металле околошовной зоны поверхностно-активных элементов (углерода, кислорода и др.), которые совместно с другими примесями могут образовывать легкоплавкие эвтектики и в конечном итоге обусловливать появление горячих трещин. Кроме того, при длительной эксплуатации в этой зоне могут выделяться мелкодисперсные карбиды и интерметаллиды. Образование непрерывной прослойки карбидов и интерметаллидов по границам зерен приводит к охрупчиванию шва. При сварке этих сталей для предупреждения горячих трещин в шве часто получают наплавленный металл, по составу отличающийся от основного и имеющий двухфазную структуру. Однако в процессе высокотемпературной эксплуатации происходит карбидное и интерметаллидное упрочнение такого наплавленного металла и соответствующее снижение его пластических свойств, что приводит к локализации в околошовной зоне деформаций и образованию в ней трещин. Этому способствуют и значительные остаточные сварочные напряжения, а также рабочие напряжения. Предотвращение подобных локальных разрушений достигается термической обработкой: аустенизацией при 1050—1100° С для снятия остаточных сварочных напряжений, самонаклепа и придания сварному соединению более однородных свойств. В некоторых случаях аустенизация сопровождается последующим стабилизирующим отжигом при 750—800° С для получения относительно стабильных структур в результате выпадения карбидной и интерметаллидной фаз.

Локальные разрушения характерны для участка перегрева околошовной зоны и являются межкристаллическими разрушениями вследствие концентрации деформаций по границам зерен и развития процессов межзеренного проскальзывания. Упрочнение границ зерен стали типа Х16Н9М2 за счет молибдена, образующего карбиды по границам зерен, а также уменьшение содержания углерода (до 0,02%) или увеличение содержания бора до 0,5% в сталях 1Х15Н24В4Т (ЭП164) и 1Х14Н14В2М (ЭИ257) соответственно повышает сопротивляемость сталей локальным разрушениям (табл. 5). Другим средством снижения склонности к локальным разрушениям является получение более пластичного металла шва.

5. Сопротивление локальным разрушениям металла околошовной зоны ряда жаропрочных аустенитных сталей

Сталь	Метод ЦКТИ	Метод ИМЕТ—ЦНИИчМ					Проба ИЭС
		Характеристики ТИХ			Свойства при 650°С после деформации в ТИХ со скоростью 0,6 $v_{кр}$		
	Относительное удлинение, %, при 650°С и скорости деформации 0,67%/ч	$\Delta_{кр}$, мм	$t_в$, с	$v_{кр}$, м/мин	ψ, %	$\sigma_в$, кгс/мм²	Наличие трещин
Х16Н9М2	2	0,105	0,07	9,0	25	24	Нет
12Х18Н12Т	4,2—8	—	—	—	—	—	Есть
1Х16Н14В2Б (ЭП17)	4—12	0,05	4,0	0,75	—	—	—
1Х16Н16В2МБР (ЭИ184)	3—7	0,13	4,3	1,8	14	32	—
09Х14Н18В2БР (ЭИ695Р)	5,5—7,5	0,19	5,1	2,2	—	—	Нет (без В)
08Х15Н24В4Т (ЭП164)	—	0,12	4,6	1,6	6	18	Есть (без В)
1Х14Н14В2М (ЭИ257)	—	—	—	—	—	—	Нет (с 0,5% В) Есть Нет (при 0,02% С)
1Х15Н35В5Т (ЭИ725)	—	0,11	3,9	1,7	6	23	Есть

Примечание. Все стали промышленных плавок и перед испытаниями имели состояние после проката.

При сварке высокопрочных сталей в околошовной зоне возможно образование холодных трещин. Поэтому до сварки рекомендуется произвести их аустенизацию для получения высоких пластических свойств металла, а упрочняющую термическую обработку проводить после сварки. Предварительный и сопутствующий нагрев до 350—450° С также уменьшает опасность образования холодных трещин.

При сварке жаростойких сталей под действием нагрева в металле швов могут наблюдаться такие же структурные изменения, как и при сварке жаропрочных сталей. Большинство жаростойких сталей и сплавов имеют большой запас аустенитности и поэтому при сварке не претерпевают фазовых превращений, кроме карбидного и интерметаллидного дисперсионного твердения. На этих сталях также возможно образование холодных трещин в шве и околошовной зоне, предупреждение которых в некоторых случаях может быть достигнуто предварительным нагревом до 250—550° С.

Высоколегированные аустенитные стали и сплавы наиболее часто используют как коррозионно-стойкие. Основным требованием, которое предъявляется к сварным соединениям, является стойкость к различным видам коррозии. Межкристаллитная коррозия может развиваться как в металле шва, так и в основном металле у линий сплавления (ножевая коррозия) или на некотором удалении

от шва. Механизм развития этих видов коррозии одинаков, однако причины возникновения названных видов межкристаллитной коррозии различны.

Межкристаллитная коррозия в металле шва возникает в результате выделения из аустенита под действием термического цикла сварки карбидов хрома, приводящих к обеднению хромом приграничных объемов зерен (рис. 5, *а*). Основными причинами этого являются повышенное содержание в металле шва углерода и отсутствие или недостаточное содержание титана или ниобия. Стойкость шва против межкристаллитной коррозии уменьшается в результате длительного воздействия нагрева при неблагоприятном термическом цикле сварки или эксплуатации изделия (рис 5, *б*). Аустенитно-ферритные швы со сплошной структурой и извилистыми очертаниями границ зерен имеют повышенную стойкость против

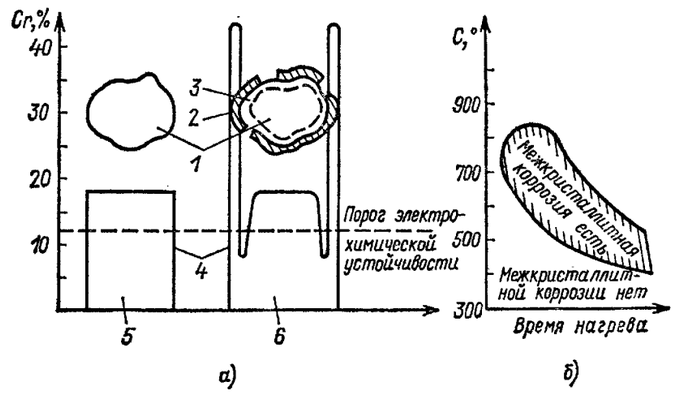


Рис. 5. Схемы влияния распределения хрома по телу зерна (*а*) и продолжительности нагрева (*б*) на склонность аустенитной стали и сварных швов к межкристаллитной коррозии:

1 — тело аустенитного зерна; *2* — карбиды, выделившиеся по границам зерен; *3* — пограничная область зерна, обедненная хромом; *4* — распределение хрома; *5* — закаленное состояние стали (нет коррозии); *6* — состояние стали после нагрева в критическом интервале температур (есть коррозия)

межкристаллитной коррозии по сравнению с аустенитными. Возрастание протяженности границ зерен вследствие измельчения зерен увеличивает площадь поверхности, на которой выделяются карбиды. Выделяющиеся карбиды более дисперсны, и местное обеднение объема зерна хромом происходит на меньшую глубину. Кроме того, процессы диффузии в феррите происходят значительно быстрее, что ускоряет выравнивание концентрации хрома в обедненных приграничных и центральных участках зерен.

Межкристаллитная коррозия (МКК) основного металла на некотором расстоянии от шва также вызвана действием термического цикла сварки на ту часть основного металла, которая была нагрета до критических температур.

Склонность стали и швов к межкристаллитной коррозии предупреждается: 1) снижением содержания углерода до пределов его растворимости в аустените (до 0,02—0,03%); 2) легированием более энергичными, чем хром, карбидообразующими элементами (стабилизация титаном, ниобием, танталом, ванадием и др.); 3) стабилизирующим отжигом при 850—900° С в течение 2—3 ч или аустенизацией — закалкой с 1050—1100° С; 4) созданием аустенитно-ферритной структуры с содержанием феррита до 20—25% путем дополнительного легирования хромом, кремнием, молибденом, алюминием и др. Однако такое высокое содержание в структуре феррита может понизить стойкость металла к общей коррозии. Эти же меры способствуют и предупреждению ножевой коррозии.

Ножевая коррозия поражает основной металл. Этот вид коррозии развивается в сталях, стабилизированных титаном и ниобием на участках, нагретых при сварке до температур выше 1250° С, где карбиды титана и ниобия растворяются в аустените. Повторное тепловое воздействие на этот металл критических температур 500—800° С (например, при многослойной сварке) приведет к сохранению титана и ниобия в твердом растворе и выделению карбидов хрома.

Общая коррозия, т. е. растворение металла в коррозионной среде, может развиваться в металле шва, на различных участках или в околошовной зоне в целом и в основном металле. В некоторых случаях наблюдается равномерная общая коррозия основного металла и сварного соединения.

Имеется еще один вид коррозионного разрушения —коррозионное растрескивание, возникающее под совместным действием растягивающих напряжений и агрессивной среды. Разрушение развивается как межкристаллитное, так и транскристаллитное. Снижение остаточных сварочных напряжений — одна из основных мер борьбы с этим видом коррозионного разрушения.

ОБЩИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СВАРКИ

Аустенитные стали и сплавы обладают комплексом положительных свойств, поэтому одну и ту же сталь иногда можно использовать для изготовления изделий различного назначения: коррозионно-стойких, хладостойких или жаропрочных. При этом требования к свойствам сварных соединений и технология сварки будут различными. Однако теплофизические свойства аустенитных сталей и склонность к образованию в шве и околошовной зоне горячих трещин определяют некоторые общие особенности их сварки.

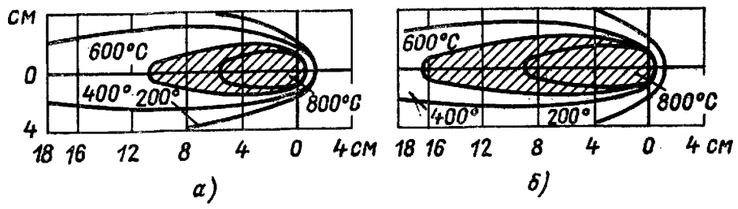


Рис. 6. Схемы температурных полей при сварке углеродистой (*а*) и хромоникелевой сталей (*б*)

Характерные для большинства высоколегированных сталей низкий коэффициент теплопроводности и высокий коэффициент линейного расширения обусловливают при одинаковой погонной энергии и прочих равных условиях (метода сварки, геометрии кромок, жесткости соединения и др.) расширение зоны проплавления и областей, нагретых до различных температур, и увеличение суммарной пластической деформации металла шва и околошовной зоны (рис. 6). Это увеличивает коробление изделий. Поэтому для высоколегированных сталей следует применять способы и режимы сварки, характеризующиеся максимальной концентрацией тепловой энергии, или уменьшать ток по сравнению с током при сварке углеродистой стали. Нагрев до высоких температур сварочной проволоки в вылете или металлического стержня электрода для ручной сварки за счет повышенного удельного электросопротивления при автоматической и полуавтоматической дуговой сварке требует уменьшения вылета электрода и повышения скорости его подачи. При ручной дуговой сварке уменьшают длину электродов и допустимую плотность сварочного тока.

При сварке аустенитных сталей пластическая деформация металла шва и околошовной зоны в результате больших коэффициентов линейного расширения и усадки, а также отсутствия полиморфных превращений происходит в большей степени, чем при сварке углеродистых сталей перлитного класса (табл. 6). В этих условиях при многослойной сварке металл околошовной зоны и первые слои металла шва могут упрочниться под действием многократного пластического деформирования, т. е. наблюдается явление самонаклепа при сварке. Влияние этого явления на свойства металла шва определяется жесткостью свариваемых элементов (табл. 7). В относительно более жестких соединениях, где самонаклеп вызывает повышение прочностных характеристик, наблюдают повышение остаточных напряжений (табл. 8) в отдельных случаях до 45—50 кгс/мм². Такие сравнительно высокие остаточные напряжения при низкой релаксационной способности аустенитных сталей требуют выбора такого режима термической обработки, который обеспечивает снижение остаточных напряжений, снятие самонаклепа и максимально возможную гомогенизацию структуры сварного соединения.

6. Теплофизические свойства хромоникелевых аустенитных сталей

Свойства	Сталь	
	типа 18-8	25-20
Температура плавления, °С	1400—1425	1388—1410
Плотность, г/см³	7,90	7,82
Теплоемкость, кал/град	0,12	0,12
Коэффициент теплопроводности, кал/(см·с·°С)	0,039	0,03—0,04
Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$, 1/°С, при нагреве:		
от 0 до 100°С	17,3	15,0
от 0 до 500°С	18,5	18,0
Удельное электрическое сопротивление при 20°С, Ом·мм²/м	0,73	0,73
Температура начала интенсивного окалинообразования, °С	850—900	1150

7. Свойства металла шва, выполненного аустенитными электродами ЦТ-7

Условия сварки	Термическая обработка	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$	δ_5	ψ
		кгс/мм²		%	
Незакрепленные пластины	Исходное состояние	38,5 52,7	60,5 66,9	40,0 27,4	50,0 49,2
Жесткий узел	Аустенизация при 1100°С, 2 ч	27,0	64,1	56,1	56,3

8. Остаточные (тангенциальные) напряжения (кгс/мм²) в кольцевых швах различной жесткости аустенитных сталей ЭИ257 и ЭИ680, выполненных электродами ЦТ-7

Состояние	Условная степень жесткости				
	1	2	3	4	5
Исходное	18,6	22,5	21,5	—	35,2
Стабилизация (отпуск) при 850°С, 10 ч	—	—	7,1	9,7	6,7
Аустенизация при 1050°С и отпуск при 850°С	—	3,0	—	—	—

К числу основных трудностей, возникающих при сварке аустенитных сталей, относится также необходимость повышения стойкости металла шва и околошовной зоны против образования трещин. Горячие трещины являются межкристаллитным разрушением и разделяются на кристаллизационные и подсолидусные; последние возникают при температуре ниже линии солидуса, т. е. после окончания процесса кристаллизации. Вероятность появления кристаллизационных трещин определяется характером изменения пластичности сплавов при деформировании металла в твердо-жидком состоянии.

В качестве критерия сопротивления металла околошовной зоны хрупкому межкристаллическому разрушению принимают температуру восстановления пластичности ($T_в$) и прочности металла при охлаждении (метод ИМЕТ-1). Чем выше $T_в$ и интенсивнее восстановление пластичности, тем меньше вероятность хрупкого межкристаллитного разрушения (табл. 9). Однако при сравнении сопротивляемости образованию горячих трещин различных сплавов следует учитывать темп нарастания внутренних деформаций при сварке. Поэтому оценка по величине $T_в$ часто требует корректировки по результатам технологических проб.

С увеличением содержания никеля, углерода, алюминия и титана в аустенитных сталях $T_в$ снижается, а измельчение зерна способствует повышению $T_в$. С измельчением кристаллитов в шве при одинаковом объеме (толщине) жидких прослоек пластичность двухфазных сред также возрастает. При этом важны не только размер и форма кристаллитов, но и характер распределения напряжений сдвига относительно направления их преимущественного роста. В связи с этим предлагают следующие пути повышения сопротивляемости образованию кристаллизационных трещин: 1) подавление столбчатой кристаллизации и измельчение кристаллической структуры путем легирования элементами-модификаторами, а также элементами, способствующими образованию высокотемпературных вторых фаз при кристаллизации; 2) повышение чистоты сплавов по примесям, способствующим образованию при кристаллизации легкоплавких фаз в той области составов, в которой увеличение количества этих фаз снижает технологическую прочность, и, наоборот, увеличение количества легирующих элементов, образующих эвтектики, в области составов сплавов, близких к эвтектическим. Эти пути сужают температурный интервал хрупкости и повышают запас пластичности.

Технологические меры борьбы с трещинами направлены на изыскание рациональных способов и режимов сварки плавлением и конструктивных форм сварных соединений, снижающих темп нарастания внутренних деформаций в процессе затвердевания. Межкристаллитное разрушение однофазных аустенитных сварных швов при температурах ниже температуры затвердевания в условиях нарастающих напряжений (подсолидусные трещины) по схеме близко к разрушению при высокотемпературной ползучести. Необходимым условием образования зародышевых трещин такого разрушения является межзеренное проскальзывание, которое раскрывает как ступеньки в границах, так и уже существующие микрополости, образовавшиеся вследствие выделения вакансий на границах, перпендикулярных действию растягивающих напряжений.

Для повышения сопротивляемости металлов и их однофазных сплавов образованию подсолидусных горячих трещин при сварке рекомендуют: 1) легирование сплавов элементами, снижающими диффузионную подвижность атомов в решетке или способствующими созданию фрагментарной литой структуры (искривление границ кристаллитов, образование в процессе кристаллизации дисперсных вторых фаз и выделений при последующем охлаждении); 2) повышение чистоты основного металла по примесям внедрения; 3) сокращение времени нахождения металла при температуре высокой диффузионной подвижности (увеличение скорости охлаждения металла сварных швов) и снижение темпа нарастания упругопластических деформаций при охлаждении (ограничение деформаций за счет выбора рациональной конструкции соединений).

Установлены следующие наиболее важные металлургические факторы, способствующие повышению сопротивляемости металла шва образованию горя-

Сплавы	Содержание, %			Исходное состояние (термическая обработка)	T_{max} цикла, °С	$T^{*1}_{к.н}$ °,С		$T^{*2}_{н.о}$ °,С		Минимальная прочность в ТИХ кгс/мм²
	B	Ti	Прочие			для ψ и δ	для $\sigma_в$	для ψ и δ	для $\sigma_в$	
Аустенитно-ферритные стали: Х25Н5ТМФ	—	0,1	0,09 С	Прокат (40 % феррита), отливка (40 % феррита)	1340	1260 1300	1260 1300	1310	1310	5,5 6,2
Х19Н10Б	—	—	0,12 С; 0,78 Nb	Металл, наплавленный электродами ЦТ-12 (11% феррита)	1350	1280	1280	1270	1270	6,6
Х21Н10Б	—	—	0,12 С; 0,77 Nb	То же (7 % феррита)		1330	1330	1290	1290	8,8
Х22Н10Б	—	—	0,10 С; 0,75 Nb	То же (2,5 % феррита)		1340	1340	1300	1300	8,0
Аустенитно-мартенситные стали: Х20Н5Г2Т	—	—	—	Прокат (950°С, 0,5 ч, воздух)		1260	1240	1240	1240	1,0
Х20Н5Т	—	—	—	Прокат (950°С, 0,5 ч, воздух)		1290	1260	1270	1260	2,0

Продолжение табл. 9

Сплавы	Содержание, %			Исходное состояние (термическая обработка)	T_{max} цикла, °С	$T^{*1}_{к.н}$ °,С		$T^{*2}_{н.о}$ °,С		Минимальная прочность в ТИХ, кгс/мм²
	B	Ti	Прочие			для ψ и δ	для $\sigma_в$	для ψ и δ	для $\sigma_в$	
Аустенитные стали; 12Х18Н9Т	—	—	—	Прокат (1050°С, 1 ч, воздух)	1320	Провала пластичности и прочности нет (при 1320°С $\psi \geqslant 80\%$)				5,0
37Х12Н8Г8МФБ (ЭИ481)	—	—	0,36 С	Прокат	1300	1210	1200	950	1050	3,0
1Х16Н16В2МБР (ЭИ184)	0,005	—	—	Прокат (1100°С, 0,5 ч, воздух)	1350	1220	1240	1180	1180	4,0
1Х14Н18В2Б (ЭИ695)	—	—	0,90 Nb; 0,11 С		1300	Провал пластичности неглубокий (при 1320°С $\psi \geqslant 20\%$)				10,2
09Х14Н18В2БР (ЭИ965Р)	0,005	—	0,90 Nb; 0,11 С		1350	1250	1240	1240	1240	6,1
09Х14Н18В2БР1 (ЭИ726)	0,008	—	0,90 Nb; 0,11 С	—	1300	1210	1210	1150	1150	7,2
	0,012	—	0,90 Nb; 0,11 С			1160	1160	1110	1110	8,2
	0,014	—	0,90 Nb; 0,11 С			1110	1060	1090	1090	10,0
ХН35ВТ (ЭИ612)	—	1,3	—	Прокат, термическая обработка на мелкое зерно (1100°С)		1250	1260	1260	1260	7,0
	—	1,1	—	Прокат, термическая обработка на крупное зерно (1150°С)		1250	1220	1000	1070	5,0

чих трещин при сварке аустенитных сталей: 1) образование двухфазной структуры в высокотемпературной области при кристаллизации металла за счет выделения первичного феррита, дисперсных частиц тугоплавкой фазы или боридной фазы и хромоникелевой эвтектики; 2) ограничение содержания примесей, образующих легкоплавкие фазы, с целью сужения эффективного интервала кристаллизации.

Для измельчения структуры используют легирование наплавленного металла элементами, способствующими выделению при кристаллизации металла высокотемпературного δ-феррита. Наличие δ-феррита измельчает структуру металла и уменьшает концентрацию Si, P, S и некоторых других примесей в межкристаллитных областях за счет большей растворимости этих примесей в δ-феррите, что уменьшает опасность образования легкоплавких эвтектик.

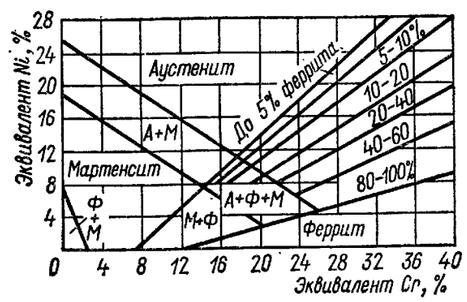


Рис. 7. Диаграмма Шеффлера

Количество ферритной фазы в наплавленном металле после его охлаждения зависит от состава этого металла и скорости охлаждения в области высоких и средних температур. Приближенное представление о концентрации феррита в аустенитно-ферритном металле дает диаграмма Шеффлера, составленная по опытным данным применительно к скорости охлаждения, характерной для обычных режимов ручной дуговой сварки (рис. 7). Рекомендуемое содержание ферритной фазы в наплавленном металле ограничивается 2—6%. При сварке сталей с более высокой степенью аустенитности, например 08Х18Н12Т, Х14Н14 и др., пределы содержания ферритной фазы в наплавленном металле повышают для того, чтобы обеспечить ее присутствие в шве с учетом перемешивания наплавленного металла с основным.

С увеличением доли основного металла используют, например, электроды ЦТ-15-1 (08Х20Н9Г2), обеспечивающие получение структуры, содержащей 5,5—9% феррита, или ЦТ-16-1 (08Х20Н9ВБ), обеспечивающие получение структуры, содержащей 6,0—9,5% феррита. Иногда при сварке корневых слоев многопроходных швов на сталях типа 2Х25Н20С2, склонных к образованию кристаллизационных трещин, применяют электроды ГС-1 (10Х25Н9Г6С2), обеспечивающие получение структуры, содержащей 25—30% феррита в наплавленном металле.

Для кооррозионно-стойких сталей повышение содержания первичного феррита до 15—25% улучшает характеристики за счет большей растворимости хрома в феррите, чем в аустените, что предотвращает обеднение пограничных слоев хромом и сохраняет высокую сопротивляемость межкристаллитной коррозии. Для жаропрочных и жаростойких сталей с малым запасом аустенитности и содержанием никеля до 15% предупреждение горячих трещин достигается получением аустенитно-ферритной структуры с 3—5% феррита. Большое количество феррита может привести к значительному высокотемпературному охрупчиванию швов в виду их сигматизации в интервале температур 450—850° С.

Получение аустенитно-ферритной структуры швов на глубокоаустенитных сталях, содержащих более 15% Ni, потребует повышенного их легирования ферритообразующими элементами, что приведет к снижению пластических свойств шва и охрупчиванию за счет появления хрупких эвтектик, а иногда и σ-фазы. Поэтому в швах стремятся получить аустенитную структуру с мелкодисперсными карбидами и интерметаллидами и легировать швы повышенным количеством молибдена, марганца и вольфрама, подавляющими процесс образования горячих трещин. Необходимо также ограничивать в основном и наплавленном металлах содержание вредных (сера, фосфор) и ликвирующих (свинца, олова, висмута) примесей, а также газов — кислорода и водорода. Для этого следует применять режимы, уменьшающие долю основного металла в шве, и использовать стали и сварочные материалы с минимальным содержанием названных примесей. Поэтому для изготовления сварочных проволок желательно применять стали вакуумной плавки, после электрошлакового переплава или рафинирования: то же относится и к основному металлу. Техника сварки должна обеспечивать минимальное насыщение металла шва газами. Этому способствует применение для сварки постоянного тока обратной полярности. При ручной сварке покрытыми электродами следует поддерживать короткую дугу и сварку вести без поперечных колебаний. При сварке в защитных газах для предупреждения подсоса воздуха необходимо поддерживать короткий вылет электрода и выбирать оптимальными скорость сварки и расход защитных газов.

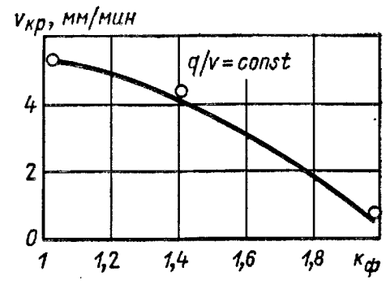


Рис. 8. Влияние коэффициента формы ванны ($k_ф = \frac{Z}{B}$) при сварке на технологическую прочность металла шва типа Х10Н65М23

Высоколегированные стали содержат в качестве легирующих присадок алюминий, кремний, титан, ниобий, хром, обладающие бо́льшим сродством к кислороду, чем железо. При наличии в зоне сварки окислительной атмосферы возможен их значительный угар, что может привести к уменьшению содержания или к полному исчезновению в структуре шва ферритной и карбидной фаз, особенно в металле с небольшим избытком ферритизаторов. Поэтому для сварки рекомендуется использовать низкокремнистые высокоосновные флюсы (фторидные) и покрытия электродов (фтористо-кальциевые). Сварка короткой дугой и предупреждение подсоса воздуха служат этой цели. Азот, являясь сильным аустенизатором, одновременно способствует измельчению структуры за счет увеличения центров кристаллизации в виде тугоплавких нитридов. Поэтому азотизация металла шва способствует повышению их стойкости против горячих трещин. Высокоосновные флюсы и шлаки, рафинируя металл шва и иногда модифицируя его структуру, повышают стойкость против горячих трещин. Механизированные способы сварки, обеспечивая равномерное проплавление основного металла по длине шва и постоянство термического цикла сварки, позволяют получить и более стабильные структуры на всей длине сварного соединения.

Важным мероприятием для борьбы с горячими трещинами является применение технологических приемов, направленных на изменение формы сварочной ванны и направления роста кристаллов аустенита, а также уменьшение силового фактора, возникающего в результате термического цикла сварки, усадочных деформаций и жесткости закрепления свариваемых кромок (рис. 8). При действии растягивающих сил перпендикулярно направлению роста столбчатых кристаллов вероятность образования трещин возрастает. При механизированных способах сварки тонкими электродными проволоками поперечные колебания электрода, изменяя схему кристаллизации металла шва, уменьшают склонность металла шва к горячим трещинам. Снижение действия усадочных деформаций достигается ограничением сварочного тока, заполнением разделки швами небольшого сечения и применением разделок соответствующих конструкций. Этому же способствует хорошая заделка кратера при обрыве дуги.

Кроме перечисленных общих особенностей сварки высоколегированных сталей и сплавов, есть особенности, определяемые их служебным назначением. При сварке жаропрочных и жаростойких сталей требуемые свойства во многих

случаях обеспечиваются термической обработкой (аустенизацией) при 1050—1100° С, снимающей остаточные сварочные напряжения, с последующим стабилизирующим отпуском при 750—800° С. При невозможности термической обработки сварку иногда производят с предварительным или сопутствующим подогревом до 350—400° С. Чрезмерное охрупчивание швов за счет образования карбидов предупреждается снижением содержания в шве углерода. Обеспечение необходимой жаростойкости достигается получением металла шва, по составу идентичного основному металлу. Это же требуется и для получения швов, стойких к общей жидкостной коррозии.

При сварке коррозионно-стойких сталей различными способами для предупреждения межкристаллитной коррозии не следует допускать повышения в металле шва углерода за счет загрязнения им сварочных материалов (графитовой смазкой проволоки и т. д.) и длительного и многократного пребывания металла сварного соединения в интервале критических температур. Поэтому сварку необходимо выполнять при наименьшей погонной энергии, используя механизированные способы, обеспечивающие непрерывность получения шва. Повторные возбуждения дуги при ручной сварке, оказывая нежелательное тепловое действие на металл, могут вызвать появление склонности его к коррозии. Шов, обращенный к агрессивной среде, следует, по возможности, сваривать в последнюю очередь, чтобы предупредить его повторный нагрев, а последующие швы в многослойных швах выполнять после полного охлаждения предыдущих и принимать меры к ускоренному охлаждению швов. Брызги, попадающие на поверхность основного металла, могут быть впоследствии очагами коррозии и должны тщательно удаляться с поверхности металла, швов, так же как и остатки шлака и флюса, которые, взаимодействуя в процессе эксплуатации с металлом, могут привести к коррозии или снижению местной жаростойкости. При сварке создание в металле шва аустенитно-ферритной структуры для повышения стойкости швов к межкристаллитной коррозии достигается легированием титаном или ниобием. Однако титан, обладающий высоким сродством к кислороду, выгорает в зоне сварки на 70—90% (при ручной дуговой сварке, сварке под кислыми флюсами). Поэтому легирование швов титаном возможно при сварке в инертных защитных газах, при дуговой и электрошлаковой сварке с использованием фтористых флюсов. В металле швов содержание титана должно соответствовать соотношению $\frac{Ti}{C} \geqslant 5$. Ниобий при сварке окисляется значительно меньше и поэтому чаще используется для легирования шва при ручной дуговой сварке. Его содержание в металле шва должно отвечать соотношению $\frac{Nb}{C} > 10$. Однако он может вызвать появление в швах горячих трещин.

ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ

Ручная дуговая сварка

Основной особенностью сварки аустенитных сталей является обеспечение требуемого химического состава металла шва при различных типах сварных соединений и пространственных положениях сварки с учетом изменения глубины проплавления основного металла и количества наплавленного металла. Это заставляет корректировать состав покрытия с целью обеспечения необходимого содержания в шве феррита и предупреждения, таким образом, образования в шве горячих трещин, а также достижения необходимой жаропрочности и коррозионной стойкости швов. Получению металла шва с необходимыми химическим составом и структурами и уменьшению угара легирующих элементов способствует применение электродов с фтористокальциевым (основным) покрытием и поддержание короткой дуги без поперечных колебаний электрода. Последнее уменьшает

10. Некоторые марки электродов для сварки высоколегированных сталей и сплавов

Стали	Марка электродов	Тип электродов по ГОСТ 10052—75	Наплавленный металл, структура
Коррозионно-стойкие стали			
08Н18Н10, 08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т, 08Х18Н12Т, 08Х18Н12Б, 08Х22Н6Т и им подобные, работающие в агрессивных средах: к металлу шва предъявляются требования по стойкости к МКК	ЦЛ-11	Э-04Х20Н9, Э-07Х20Н9, Э-08Х19Н10Г2Б	Аустенитно-ферритная с 2,5—7% α-фазы
к металлу шва предъявляются жесткие требования по стойкости к МКК	ОЗЛ-7	Э-02Х19Н9Б	Аустенитно-ферритная с 5,0—10% α-фазы
Те же стали, работающие при температурах до 600 °С в жидких агрессивных средах; к металлу шва предъявляются требования по стойкости к МКК	Л38М	Э-02Х19Н9Б	Аустенитно-ферритная с 3,0—5,0 α-фазы
10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т, 08Х18Н12Б, 08Х21Н6М2Т и им подобные, работающие при температурах до 700 °С: к металлу шва предъявляются требования по стойкости к МКК	СЛ-28	Э-08Х19Н10Г2МБ Э-09Х19Н10Г2М2Б	Аустенитно-ферритная с 4,0—5,0% α-фазы
к металлу шва предъявляются жесткие требования по стойкости к МКК	НЖ-13	Э-09Х19Н10Г2М2Б	Аустенитно-ферритная с 4,0—8,0% α-фазы
Жаропрочные стали			
12Х18Н9, 12Х18Н10Т, 08Х18Н12Т, работающие при температурах до 800 °С	ЦТ-26	Э-08Х16Н8М2 Э-08Н17Н8М2	Аустенитно-ферритная с 2,0—4% феррита
10Х23Н18 и ей подобные, работающие при температурах выше 850 °С	ОЗЛ-4 ОЗЛ-6	Э-10Х25Н13Г2	Аустенитно-ферритная с ферритом не менее 2,5%
Жаростойкие стали			
20Х20Н14С2, 08Х20Н14С2, 20Х25Н20С2, работающие при температурах 900—1100 °С	ОЗЛ	Э-12Х24Н14С2	Аустенитно-ферритная с 3—10% феррита
20Х25Н20С2, 36Х18Н25С2, работающие при температурах до 1050°С; к металлу шва предъявляются требования жаростойкости и жаропрочности	ОЗЛ-9-1	Э-28Х24Н16Г6	Аустенитно-карбидная
Х25Н38ВТ, ХН75МБТЮ и другие, работающие при высоких температурах	ЭА-981-15 (ЭА-3М6)	Э-09Х15Н25М6Г2Ф	Аустенитная

и вероятность образования дефектов на поверхности основного металла в результате прилипания брызг.

Тип покрытия электрода определяет необходимость использования постоянного тока обратной полярности, величину которого назначают так, чтобы отношение его к диаметру электрода не превышало 25—30 А/мм (табл. 11). В потолочном и вертикальном положениях сварочный ток уменьшают на 10—30% по сравнению с током, выбранным для нижнего положения сварки.

11. Ориентировочные режимы ручной дуговой сварки аустенитных сталей

Толщина металла, мм	Размеры электрода, мм		Сварочный ток, А, при положении сварки		
	Диаметр	Длина	нижнем	вертикальном	потолочном
До 2,0	2	150—200	30—50	—	—
2,5—3,0	3	225—250	70—100	50—80	45—75
3,0—8,0	3—4	250—300	85—140	75—130	65—120
8,0—12,0	4—5	300—400	85—160	75—150	65—130

Сварку покрытыми электродами рекомендуется выполнять ниточными швами и для повышения стойкости против горячих трещин применять электроды диаметром 3 мм. Во всех случаях следует обеспечивать минимальное проплавление основного металла. Электроды перед сваркой должны быть прокалены при 250—400° С в течение 1—1,5 ч для уменьшения вероятности образования в швах пор, вызываемых водородом, и трещин.

Тип электродов для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами определяется ГОСТ 10052—75. Размеры и общие технические требования регламентированы ГОСТ 9466—75. Некоторые марки электродов, рекомендуемые для различных сталей аустенитного класса, в зависимости от условий работы конструкции приведены в табл. 10, а их механические свойства — в табл. 12.

12. Типичные механические свойства при 20 °С металла швов, выполненных на высоколегированных коррозионно-стойких и жаростойких сталях

Марка электродов	$\sigma_т$ кгс/мм²	$\sigma_в$ кгс/мм²	δ, %	$a_н$, кгс·м/см²	Марка электродов	$\sigma_т$ кгс/мм²	$\sigma_в$ кгс/мм²	δ, %	$a_н$ кгс·м/см²
Коррозионно-стойкие стали					СЛ-28	—	60	38	12
ЦЛ-11	36	60	24	7	НЖ-13	45	60	26	10
ОЗЛ-7	40	64	25	10	**Жаростойкие стали**				
Л-38М	30	60	30	9					
Л-40М	35	60	24	7	ОЗЛ-5	35	60	25	6
					ОЗЛ-6	35	57	33	10
					ОЗЛ-9-1	50	65	12	5

Сварка под флюсом

Сварка под флюсом является одним из основных процессов сварки высоколегированных сталей толщиной 3—50 мм при производстве химической и нефтехимической аппаратуры. Основным преимуществом этого способа перед ручной дуговой сваркой покрытыми электродами является стабильность состава и свойств металла по всей длине шва при сварке как с разделкой, так и без разделки кромок. Это обеспечивается возможностью получения шва любой длины без кратеров, образующихся при смене электродов, равномерностью плавления электродной

проволоки и основного металла по длине шва и более надежной защитой зоны сварки от окисления легирующих компонентов кислородом воздуха. Хорошее формирование поверхности швов с мелкой чешуйчатостью и плавным переходом к основному металлу, отсутствие брызг на поверхности изделия заметно повышают коррозионную стойкость сварных соединений. Уменьшается трудоемкость подготовительных работ, так как разделку кромок производят на металле толщиной свыше 12 мм (при ручной сварке — на металле толщиной 3—5 мм). Возможна сварка с повышенным зазором и без разделки кромок стали толщиной до 30—40 мм. Уменьшение потерь на угар, разбрызгивание и огарки электродов на 10—20% снижает расход дорогостоящей сварочной проволоки.

Техника и режимы сварки высоколегированных сталей и сплавов имеют ряд особенностей по сравнению со сваркой обычных низколегированных сталей. Для предупреждения перегрева металла и связанного с этим укрупнения структуры, возможности появления трещин и снижения эксплуатационных свойств сварного соединения рекомендуется выполнять сварку швами небольшого сечения. Это обусловливает применение сварочных проволок диаметром 2—3 мм, а с учетом высокого электросопротивления аустенитных сталей — необходимость уменьшения вылета электрода в 1,5—2 раза. Аустенитные сварочные проволоки в процессе изготовления сильно наклепываются и имеют высокую жесткость, что затрудняет работу правильных, подающих и токоподводящих узлов сварочных установок, снижая срок их службы.

13. Некоторые марки сварочных проволок для электродуговой сварки под флюсом и электрошлаковой сварки высоколегированных сталей

Стали	Марка проволоки по ГОСТ 2246—70
Коррозионно-стойкие стали	
12Х18Н9, 08Х18Н10, 12Х18Н10Т, 12Х18Н9Т и им подобные: к металлу шва предъявляются требования стойкости к МКК	Св-01Х19Н9, Св-04Х19Н9, Св-06Х19Н9Т, Св-07Х18Н9ТЮ, Св-04Х19Н9С2, Св-05Х19Н9ФЗС2
12Х18Н10Т, 08Х18Н10Т, 08Х18Н12Т, 08Х18Н12Б и им подобные, работающие при температурах выше 350 °С или в условиях, когда к металлу шва предъявляются требования стойкости к МКК	Св-07Х19Н10Б, Св-05Х20Н9ФБС
10Х17Н13М3Т, 08Х18Н12Б и им подобные: к металлу шва предъявляются жесткие требования стойкости к МКК	Св-08Х19Н10М3Б, Св-06Х20Н11М3ТБ
08Х18Н10, 12Х18Н10Т, 12Х18Н9Т и им подобные, свариваемые в углекислом газе; к металлу шва предъявляются требования стойкости к МКК	Св-08Х25Н13БТЮ
Жаропрочные стали	
12Х18Н9 с аустенитно-ферритными швами	Св-04Х19Н9
12Х18Н9Т, 08Х18Н12Т и др. с аустенитно-ферритными швами	Св-08Х18Н8Г2Б
Х15Н35В4Т	Св-06Х19Н10М3Т
Жаростойкие стали	
20Х23Н18, 08Х20Н14С2 и им подобные	Св-07Х25Н13
20Х23Н18 и подобные, работающие при 900—1100 °С	Св-07Х25Н12Г2Т, Св-06Х25Н12ТЮ, Св-08Х25Н13БТЮ
ХН35ВЮ, 20Х25Н20С2 и им подобные, работающие при температурах до 1200 °С	Св-08Н50

Шов легируют через флюс или проволоку. Последний способ более предпочтителен, так как обеспечивает повышенную стабильность состава металла шва. Для сварки под флюсом аустенитных сталей и сплавов используют сварочные проволоки, выпускаемые по ГОСТ 2246—70 и по ведомственным техническим усло-

виям (табл. 13), и низкокремнистые фторидные и высокоосновные бесфтористые флюсы, создающие в зоне сварки безокислительные или малоокислительные среды, способствующие минимальному угару легирующих элементов (табл. 14). У флюсов, применяемых для коррозионно-стойких сталей, необходимо контролировать углерод, содержание которого не должно быть выше 0,1—0,2%. Наибольшее применение для сварки коррозионных сталей получили низкокремнистые флюсы АН-26, 48-ОФ-10 и АНФ-14.

14. Флюсы для электродуговой и электрошлаковой сварки высоколегированных сталей

Назначение	Марка флюса	Метод изготовления
Автоматическая электродуговая сварка сталей:	АНФ-14, АНФ-16, 48-ОФ-10	Выплавка
аустенитно-ферритными швами	К-8	Спекание
с небольшим запасом аустенитности аустенитно-ферритными швами	АН-26	Выплавка
с большим запасом аустенитности чисто аустенитными швами	АНФ-5 ФЦК	Выплавка Спекание при 750 °С
Автоматическая электродуговая и электрошлаковая сварка сталей с большим запасом аустенитности чисто аустенитными швами	48-ОФ-6	Выплавка
Электрошлаковая сварка сталей с большим запасом аустенитности чисто аустенитными швами	АНФ-1, АНФ-6, АНФ-7, АН-29, АН-292	Грануляция минерала

15. Кратковременные механические свойства при 20 °С металла шва и сварного соединения высоколегированных сталей и сплавов

Стали	Толщина металла, мм	Марка проволоки	Сварка	Испытуемый образец	$\sigma_т$, кгс/мм²	$\sigma_в$, кгс/мм²	δ, %
20Х23Н8	12	Св-13Х25Н18	Электродуговая под флюсом: АНФ-5	Металл шва[1]	66,5	79,7	5,9
ХН35ВТ		Св-30Х15Н35В3Б3Т	АНФ-17	Металл шва Металл шва[2]	46,3 47,4	65,4 78,4	24,7 15,8
ХН77ТЮР	100	Св-08Н50	Электрошлаковая, пластинчатым электродом под флюсом: АНФ-7	Металл шва[1]	58,7	76,2	18,0
ХН78Т	125	Св-08Н50	АНФ-1	Металл шва	28,8	63,8	17,4

Термическая обработка: [1] Аустенизация при 1080 °С, 2 ч на воздухе и старение — при 700 °С, 16 ч. [2] Старение при 800 °С, 10 ч.

Сварку жаростойких сталей аустенитно-ферритными проволоками типа 08Х25Н13БТЮ выполняют под низкокремнистыми флюсами АН-26, АНФ-14 и 48-ОФ-10. При сварке стабильноаустенитными проволоками и проволоками,

содержащими легкоокисляющиеся элементы (алюминий, титан, бор и др.), применяют нейтральные фторидные флюсы АНФ-5, 48-ОФ-10. Для обеспечения стойкости против горячих трещин аустенитных швов рекомендуют применять фторидный бористый флюс АНФ-22 (CaF_2—B_2O_3).

Сварку под фторидными флюсами производят на постоянном токе обратной полярности, а под высокоосновными бесфтористыми флюсами — на постоянном токе прямой полярности. При этом для получения той же глубины проплавления, что и на углеродистых сталях, сварочный ток следует снизить на 10—30%. Для снижения вероятности образования пор в швах флюсы для высоколегированных сталей необходимо прокаливать непосредственно перед сваркой при 500—900° С в течение 1—2 ч. Остатки шлака и флюса на поверхности швов необходимо тщательно удалять.

Сварка под флюсом в сочетании с высоколегированными проволоками обеспечивает получение требуемых свойств сварных соединений (табл. 15 и 16).

16. Длительная прочность сварных соединений высоколегированных сталей и сплавов

Марка металла	Сварка	Марка проволоки	Условия испытания: Температура, °С	Постоянное напряжение, кгс/мм²	Время до разрушения, ч
12Х18Н9Т	Под флюсом В аргоне В углекислом газе	Св-01Х19Н9	600	30	1,5 3,0 4,0
	Под флюсом В аргоне В углекислом газе	Св-06Х19Н9Т			35,0 21,0 218,0
	Под флюсом В аргоне В углекислом газе	Св-07Х19Н10Б			33 86 320
ХН77ТЮР[1]	Электрошлаковая пластинчатым электродом	Св-06Х19Н9Т	700	18	42,0
		Св-08Н50		40	116,0
20Х23Н18	Под флюсом	Св-13Х25Н18			46—79
ХН78Т[2]	Аргонодуговая вольфрамовым электродом	—		21	125—161

Термическая обработка сварного соединения: [1] Аустенизация при 1080°С, 8 ч и старение при 700°С, 16 ч. [2] Аустенизация при 1050°С, 15 мин и старение при 700°С, 16 ч.

Электрошлаковая сварка

Пониженная чувствительность к образованию горячих трещин, позволяющая получать аустенитные швы без трещин, объясняется особенностями электрошлаковой сварки: малой скоростью перемещения источника нагрева, характером кристаллизации металла сварочной ванны и отсутствием в стыковых соеди-

нениях больших угловых деформаций. Однако длительное пребывание металла при 1200—1250° С, приводя к необратимым изменениям в его структуре, снижает прочностные и пластические свойства околошовной зоны, что повышает склонность сварных соединений теплоустойчивых сталей к локальным (околошовным) разрушениям в процессе термической обработки или эксплуатации при повышенных температурах. При сварке коррозионно-стойких сталей перегрев стали в околошовной зоне может вызвать ножевую коррозию, поэтому следует производить термическую обработку сварных изделий (закалку или стабилизирующий отжиг).

Для электрошлаковой сварки коррозионно-стойких сталей используют флюсы АНФ-6, АНФ-7, АНФ-8, 48-ОФ-6, АНФ-14 и др., а для жаростойких сталей — флюсы АНФ-1П, АНФ-7, АНФ-8 и высокоосновный АН-292. При сварке жаростойких сталей двухфазным швом типа Х25Н13 можно применять низкокремнистые флюсы АНФ-14 и АН-26. Применение фторидных безокислительных флюсов, особенно при сварке жаропрочных сталей и сплавов, не гарантирует угара легкоокисляющихся легирующих элементов (титана, марганца и др.) в результате проникновения кислорода воздуха через поверхность шлаковой ванны; это вызывает необходимость в некоторых случаях защищать поверхность шлаковой ванны путем обдува ее аргоном.

Электрошлаковую сварку можно выполнять проволокой диаметром 3 мм или пластинчатыми электродами толщиной 6—20 мм. Изделия большой толщины со швами небольшой протяженности целесообразнее сваривать пластинчатым электродом. Изготовлять пластинчатый электрод более просто, чем проволоку, но сварка проволокой обеспечивает возможность изменения формы металлической ванны и характера кристаллизации шва, что способствует получению швов без горячих трещин. Однако жесткость сварочной проволоки затрудняет длительную и надежную работу токоподводящих и подающих узлов сварочной аппаратуры. Типовые режимы электрошлаковой сварки приведены в табл. 17.

17. Типовые режимы электрошлаковой сварки высоколегированных сталей и сплавов

Марка флюса	Толщина металла	Электрод	Глубина шлаковой ванны	Зазор	Скорость подачи электрода, м/ч	Ток, А	Напряжение, В
	мм						
АНФ-7	100	Проволока диаметром 3 мм	25—35 15—20	28—32	330 2,4	600—800 1200—1300	40—42 24—26
АНФ-1П АНФ-6	200	Пластина: 10×100 12×200	—	38—40	1,9	3500—4000 1800—2000	22—24 26—28

Некоторые данные о материалах, используемых при электрошлаковой сварке, и свойствах сварных соединений приведены в табл. 12—15.

Сварка в защитных газах

В качестве защитных используют инертные (аргон, гелий) и активные (углекислый газ, азот) газы, а также различные смеси инертных или активных газов и инертных с активными.

Сварку в защитных газах можно использовать для соединения материалов различной толщины (от десятых долей до десятков миллиметров). Применение защитных газов с различными теплофизическими свойствами и их смесей изменяет тепловую эффективность дуги и условия ввода тепла в свариваемые кромки и расширяет технологические возможности процесса сварки. При сварке в инертных газах повышается стабильность дуги и снижается угар легирующих элементов, что важно при сварке высоколегированных сталей. Заданный химический состав металла шва можно получить путем изменения состава сварочной (присадочной) проволоки и доли участия основного металла в образовании шва, когда составы основного и электродного металлов значительно различаются, или путем изменения характера металлургических взаимодействий за счет значительного изменения состава защитной атмосферы при сварке плавящимся электродом. Сварка в среде защитных газов обеспечивает формирование швов в различных пространственных положениях, что позволяет применять этот способ вместо ручной дуговой сварки покрытыми электродами.

Сварку аустенитных сталей в инертных газах выполняют неплавящимся (вольфрамовым) или плавящимся электродом.

Сварку вольфрамовым электродом производят в аргоне по ГОСТ 10157—73 и гелии или их смесях и применяют обычно для материала толщиной до 5—7 мм. Однако в некоторых случаях, например при сварке неповоротных стыков труб, применяют и при большой толщине стенки (до 100 мм и более). Применять этот способ необходимо также для сварки корневых швов в разделке при изготовлении ответственных толстостенных изделий.

В зависимости от толщины и конструкции сварного соединения сварку вольфрамовым электродом производят с присадочным материалом или без него. Процесс осуществляют вручную с использованием специальных горелок или автоматически на постоянном токе прямой полярности (табл. 18). Исключение составляют стали и сплавы с повышенным содержанием алюминия, когда для разрушения поверхностной пленки окислов, богатой алюминием, следует использовать переменный ток.

18. Примерные режимы аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом высоколегированных сталей

Толщина металла, мм	Тип соединения	Ток, А	Расход аргона, л/мин	Скорость, м/ч
	Ручная сварка			
1 2 3	С отбортовкой	35—60 75—120 100—140	3,5—4 5—6 6—7	— — —
1 2 3	Встык без разделки с присадкой	40—70 80—130 120—160	3,5—4 5—6 6—7	— — —
	Автоматическая сварка			
1 2 4	Встык с присадкой	80—140 140—240 200—280	4 6—7 7,8	30—60 20—30 15—30
1 2,5 4	Встык без присадки	60—120 110—200 130—250	4 6—7 7—8	35—60 25—30 25—30

Примечание. Диаметр присадочной проволоки 1,6—2,0 мм; ток постоянный прямой полярности.

Импульсная сварка Сварку можно выполнять непрерывно горящей или импульсной дугой. Импульсная дуга уменьшает протяженность околошовной зоны и коробление свариваемых кромок, а также обеспечивает хорошее формирование шва на материале малой толщины. Особенности кристаллизации металлов сварочной ванны

19. Ориентировочные режимы полуавтоматической и автоматической аргонодуговой сварки встык плавящимся электродом нержавеющих сталей в нижнем положении

Толщина металла, мм	Подготовка кромок	Число слоев	Диаметр сварочной проволоки, мм	Ток, А	Скорость сварки, м/ч	Расход аргона, л/мин	Толщина металла, мм	Подготовка кромок	Число слоев	Диаметр сварочной проволоки, мм	Ток, А	Скорость сварки, м/ч	Расход аргона, л/мин
Полуавтоматическая сварка							**Автоматическая сварка**						
1,5	Без разделки	1	0,8—1	90—110	—	6—8	1	Без разделки	1	0,5	30—40	70	6
2,5			1	140—180			2				200—210		
3				150—260			3			1	220—230	55—60	8—9
4		1—2		160—300		7—9	4				230—240	50	
6	С V-образной разделкой		1,6—2	220—320		9—12	5	С V-образной разделкой под углом 50°	2	2	260—275	44	
8		2		240—360		11—15	6,5				250—280	34	
10			2	290—300		12—17	8				300—380	15—30	11—15
							10				330—440	15—30	12—17

20. Режимы сварки сталей типа 18-8 (постоянный ток, обратная полярность)

Толщина металла, мм	Катет шва, мм	Тип соединения	Зазор, мм	Процесс сварки	Защитный газ	Диаметр электрода, мм	Ток, А	Напряжение, В	Вылет электрода, мм	Расход газа, л/мин
1,5—2,0	2—3	Стыковое и угловое без разделки	$0^{+0,5}$	ИДС Кз	Аргон	1,0—1,2 0,8	65—130 60—90	18—20 19—20	8—12	10—12
3—4	3—4		$0^{+0,5}$	ИДС Стр		1,2—1,6 0,8—1,0	90—170 130—190	19—22 20—23	12—16	12—16
5—8	4—6	Стыковое с V-образной разделкой, угловое без разделки, однопроходный шов	$0^{+0,5}$	ИДС Стр		1,6—2,0 1,2—1,6	160—300 230—300	20—25 22—26	16—20	16—20
				Кз	Гелий	1,0—1,6	160—300	24—30	10—16	40—60
12—25	—	Стыковое с V-образной разделкой, многослойный шов	$0^{+1,0}$	Стр	Аргон » Гелий	1,6—2,0 3—4 1,6—2,0	280—400 350—550 230—450	25—28 22—26 30—40	16—30 25—40 16—30	30—40 40—45 60—80

Примечание. ИДС — импульсно-дуговая сварка; Кз — сварка с короткими замыканиями; Стр — сварка со струйным переносом металла.

при этом способе сварки способствуют дезориентации структуры, что уменьшает вероятность образования горячих трещин, однако может способствовать образованию околошовных надрывов. Для улучшения защиты и формирования корня шва используют поддув газа, а при сварке корневых швов на металле повышенных толщин применяют и специальные расплавляемые вставки. При сварке вольфрамовым электродом в инертных газах погруженной дугой увеличение доли тепла, идущей на расплавление основного металла, позволяет без разделки кромок, за один проход сваривать металл повышенной толщины. Однако околошовная зона расширяется, и возникает опасность перегрева металла.

Высоколегированные стали сваривают **плазменной сваркой.** Преимуществами этого способа являются чрезвычайно малый расход защитного газа, возможность получения плазменных струй различного сечения (круглой, прямоугольной и т. д.) и изменения расстояния от плазменной горелки до изделия. Плазменную сварку можно использовать как для тонколистовых материалов, так и для металла толщиной до 12 мм. Применение ее для соединения сталей большей толщины затрудняется из-за возможности образования в швах подрезов.

Сварку плавящимся электродом производят в инертных, а также активных газах или смеси газов. При сварке высоколегированных сталей, содержащих легкоокисляющиеся элементы (алюминий, титан и др.), следует использовать инертные газы, преимущественно аргон, и вести процесс на плотностях тока, обеспечивающих струйный перенос электродного металла (табл. 19, 20). При струйном переносе дуга имеет высокую стабильность, и практически исключается разбрызгивание металла, что важно для формирования швов в различных пространственных положениях и для ликвидации очагов коррозии, связанных с разбрызгиванием при сварке коррозионно-стойких и жаростойких сталей. Однако струйный перенос возможен на токах выше критического, при которых возможно образование прожогов при сварке тонколистового металла. Добавка в аргон до 3—5% O_2 и 15—20% CO_2 уменьшает критический ток (табл. 21), а создание при этом окислительной атмосферы в зоне дуги снижает вероятность образования пор, вызванных водородом. Однако при сварке в указанных смесях газов увеличивается угар легирующих элементов, а при добавке углекислого газа возможно науглероживание металла шва (табл. 22). Добавкой к аргону 5—10% N может быть повышено его содержание в металле шва. Азот является сильным аустенизатором, и таким образом можно изменить структуру металла шва. Для сварки аустенитных сталей находит применение импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом в аргоне и смесях аргона с кислородом и с углекислым газом, обеспечивающая соединение малых толщин и струйный перенос металла при прохождении импульса тока. Одновременно импульсно-дуговая сварка вызывает измельчение структуры шва и снижение перегрева околошовной зоны, что повышает стойкость сварного соединения против образования трещин. Механические свойства сварных соединений, выполненных аргонодуговой сваркой, приведены в табл. 23.

21. Сварочный ток (А) при сварке стали типа 12Х18Н9Т в смесях аргона с 5% O_2 (обратная полярность)

Диаметр электрода, мм	Процесс сварки			Диаметр электрода, мм	Процесс сварки		
	Кр	Стр	ИДС		Кр	Стр	ИДС
0,8	50—140	145—190	40—150	2,0	110—280	280—530	100—300
1,0	60—170	170—240	50—175	3,0	160—330	330—600	150—350
1,2	75—180	180—300	60—200	4,0	180—380	380—700	180—390
1,6	90—230	230—430	70—250				

Примечание. Кр — сварка с крупнокапельным переносом.

22. Химический состав металла сварного соединения из стали 12Х18Н9Т, сваренного в различных активных газах

Объект исследования	Защитный газ	Химический состав, %					
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Ti
Проволока Св-06Х19Н9Т	—	0,08	0,99	0,59	18,5	9,60	0,55
Сталь 12Х18Н9Т		0,09	0,90	0,50	18,0	10,21	0,50
Шов	Аргон	0,08	0,95	0,54	18,2	9,83	0,48
	Аргон + 1% O_2		0,93	0,51			0,42
	Аргон + 5% O_2		0,92	0,48			0,38
	Аргон + 20% O_2	0,09	0,91	0,47	18,3	9,88	0,38
	CO_2		0,87	0,45	18,4	10,10	0,26

Примечание. Постоянный ток, обратная полярность; $I_{св} = 230 \div 280$ А; $U_{св} = 25 \div 27$ В; $v_{св} = 25$ м/ч; расход газа 12 л/мин.

23. Механические свойства швов, выполненных аргонодуговой сваркой на аустенитных сталях и сплавах

Материал	Проволока	Температура испытаний, °С	$\sigma_т$	$\sigma_р$	δ	ψ	$a_н$, кгс·м/см²
			кгс/мм²		%		
08Х18Н10Т	Св-05Х20Н9ФБС	20	48,0	78,0	24,2	48,6	8,4
	Св-08Х20Н9Г7Т	20	36,2	62,4	48,0	58,0	12,4
03Х18Н11	02Х18Н10	20	28,4	52,0	45,3	52,3	16,7
		—196	46,0	94,4	21,1	16,8	9,4
06Х23Н28М3Д3Т	06Х23Н28М3Д3Т	20	34,6	53,0	24,1	40,3	16,4
03Х20Н16АГ6	01Х19Н18Г10АМ4	20	44,8	66,3	34,0	41,3	21,5
		—196	90,9	136,9	35,0	44,0	7,9
		—253	110,0	128,0	15,5	—	7,0
		—269	124,0	155,0	22,0	—	—
36Н	36НГТ (ЭП-802)	20	—	45,0	—	—	16,0
		—196	—	77,0	—	—	9,0
		—253	—	87,0	—	—	7,0
36НХ	36НГТ	20	—	42,0	—	—	20,0
		—196	—	74,0	—	—	12,0
		—253	—	90,0	—	—	9,0
15Х17АГ14	ПП-Х17АГ14	20	51,0	90,5	49,3	39,4	7,4
	Св-08Х20Н9Г7Т	20	36,6	71,4	50,5	59,8	8,9

При сварке в углекислом газе низкоуглеродистых высоколегированных сталей с использованием низкоуглеродистых сварочных проволок, при исходной концентрации углерода в проволоке менее 0,07%, содержание углерода в металле шва повышается до 0,08—0,12%. Этого достаточно для резкого снижения стойкости металла шва к межкристаллитной коррозии. Однако науглероживание металла шва в некоторых случаях при энергичных карбидообразователях (титане, ниобии) может оказать благоприятное действие при сварке жаропрочных сталей за счет увеличения в структуре количества карбидной фазы.

Окислительная атмосфера, создаваемая в дуге за счет диссоциации углекислого газа, вызывает повышенное (до 50%) выгорание титана и алюминия. Несколько меньше выгорают марганец, кремний и другие легирующие элементы, а хром не окисляется (см. табл. 22). Поэтому при сварке коррозионно-стойких сталей в углекислом газе применяют сварочные проволоки, содержащие раскисляющие и карбидообразующие элементы (алюминий, титан и ниобий). Другим недостатком сварки в углекислом газе является большое разбрызгивание металла (потери достигают 10—12%) и образование на поверхности шва плотных пленок окислов, прочно сцепленных с металлом. Это может резко снизить коррозионную стойкость и жаростойкость сварного соединения. Для уменьшения возможности налипания брызг на основной металл следует применять специальные эмульсии, наносимые на кромки перед сваркой, а для борьбы с окисной пленкой эффективна подача в дугу небольшого количества фторидного флюса типа АНФ-5. Применение импульсной сварки также позволяет несколько снизить разбрызгивание. Сварка плавящимся электродом в углекислом газе производится на полуавтоматах и автоматах. Для сварки используют постоянный ток обратной полярности и режимы сварки, указанные в табл. 24. Сварочные проволоки, созданные для сварки в углекислом газе высоколегированных аустенитных сталей, обеспечивают требуемую коррозионную стойкость (табл. 25) и механические свойства за счет повышенного содержания титана, ниобия и элементов-ферритизаторов — кремния, алюминия, хрома (табл. 26). Например, для сварки сталей типа 12Х18Н10Т используют проволоки Св-07Х18Н9ТЮ, Св-08Х20Н9С2БТЮ, для сталей типа 12Х18Н12Т — проволоку Св-08Х25Н13БТЮ, а для хромоникелемолибденовых сталей — проволоки Св-06Х19Н10М3Т и Св-06Х20Н11М3ТБ.

24. Ориентировочные режимы дуговой сварки без разделки кромок плавящимся электродом в углекислом газе

Толщина металла, мм	Тип шва	Диаметр проволоки, мм	Вылет электрода, мм	Ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Расход CO_2, л/мин
1	Односторонний	1	—	80	16	80	10—12
3		2	15	230—240	24—28	45—50	12—15
6				250—260	28—30	30	
8	Двусторонний	3		350—360	30—32	—	—
		2	15—20	380—400		30	12—15
10		3	20—25	430—450	33—35	—	—
		2	15—20	420—440	30—32	30	12—15
		3	25—30	530—560	34—36	—	—

25. Коррозионная стойкость [г/(м·ч)] сварных соединений, выполненных сваркой в углекислом газе на хромоникелевых высоколегированных сталях

Сталь	Проволока	Концентрация азотной кислоты, %								
		30		50			56		65	
		70 °С	Кипение	50 °С	70 °С	Кипение	50 °С	Кипение	50 °С	70 °С
08Х18Н10Т	Св-08Х20Н9СБТЮ	—	—	0,003	0,010	0,41	—	—	0,007	0,026
	Св-05Х20Н9ФБС	—	—	0,003	0,009	0,23	—	—	0,004	0,018
	Св-08Х20Н9Г7Т	—	—	—	0,015	—	—	—	—	0,025
08Х21Н5Т	Св-05Х20Н9ФБС	0,001	0,011	0,002	0,011	0,30	—	—	—	—
08Х17Н5Г9АБ	Св-05Х20Н9ФБС	—	0,11	—	—	—	0,016	—	—	—
	Св-08Х20Н9СБТЮ	—	0,10	—	—	—	0,015	0,50	—	—

26. Механические свойства металла швов, выполненных сваркой в углекислом газе на хромоникелевых высоколегированных сталях (средние значения)

Сталь	Толщина стали, мм	Проволока	Температура испытаний, °С	$\sigma_т$ кгс/мм²	$\sigma_р$ кгс/мм²	δ %	ψ %	$a_н$, кгс·м/см²
12Х28АН	2	Св-08Х20Н9СБТЮ	20	55,4	78,1	37,0	57,0	5,1
		Св-08Х20Н9Г7Т		42,3	68,3	39,0	58,6	10,2
08Х21Н5Т	10	Св-08Х20Н9СБТЮ		44,8	70,8	24,3	49,0	9,2
		Св-05Х20Н9ФБС		45,4	71,4	22,1	51,2	7,6
		Св-06Х20Н7БТ (ЭП-500)		44,2	81,7	33,3	33,0	11,7
08Х18Н2Г8Т	8	Св-08Х20Н9СБТЮ		39,0	71,9	42,6	35,0	8,0
08Х18Н10Т	12	Св-08Х20Н9СБТЮ		41,2	68,7	38,9	47,4	8,6
		Св-05Х20Н9ФБС		44,3	72,4	28,6	52,4	10,0
		Св-08Х20Н9Г7Т		39,2	62,1	47,1	57,8	11,3
08Х17Н5Г9АБ	10	Св-08Х20Н9СБТЮ		44,9	74,9	30,3	45,0	8,2
		Св-05Х20Н9ФБС		49,5	79,1	38,4	43,5	7,1
10Х14Г14Н3Т	12	Х14Г14Н3Т		28,5	82,1	50,0	46,2	17,4
			—196	44,3	112,0	20,0	23,6	7,9
		04Х15Н9АГ6	20	30,0	68,0	54,0	56,3	18,0
			—196	48,0	120,0	40,0	38,0	12,8
		Св-04Х19Н9	20	—	—	—	—	12,1
			—196	—	—	—	—	3,3
15Х17АГ14	10	13Х17АГ14	20	53,4	92,8	42,1	34,1	7,2
10Х17Н13М3Т		Св-06Х20Н11М3ТБ	20	36,2	68,0	28,0	46,0	10,0
		Св-01Х19Н18Г10АМ4		32,9	58,8	45,0	49,8	10,5
08Х21Н6М2Т		Св-06Х20Н11М3ТБ		50,0	72,2	21,4	55,0	10,2
		Св-06Х19Н10М3Т		42,0	70,0	40,4	56,2	12,0
08Х17Н15М3Т		Св-01Х19Н18Г10АМ4		36,2	60,0	41,5	62,0	14,3

Электронно-лучевая сварка

Электронно-лучевая сварка обеспечивает возможность за один проход сварить без разделки кромок металл большой толщины с минимальной протяженностью околошовной зоны и очень малым коэффициентом формы шва, что является важным технологическим преимуществом этого способа. Однако и при этом способе возможно образование в шве и околошовной зоне горячих трещин и локальных разрушений в околошовной зоне. Электронно-лучевая сварка в вакууме облегчает удаление примесей и газов, но увеличивает испарение легирующих элементов. При глубоком и узком проваре часть газов может задержаться растущими кристаллами в шве и образовать поры. Сварка материала большой толщины затруднена из-за непостоянства глубины проплавления. Сложность аппаратуры и процесса обусловливает применение электронно-лучевой сварки в основном

при изготовлении ответственных конструкций из жаропрочных сталей и сплавов.

Сварку металла толщиной до 1 мм выполняют расфокусированным пучком электронов, а при большой толщине рекомендуют острофокусированный пучок. Для расширения технологических возможностей сварки целесообразно сообщить колебания электронному лучу поперек стыка, вдоль стыка или перемещать его по окружности, что улучшает структуру и свойства металла шва. Применение электронно-лучевой сварки позволяет повысить стойкость швов против образования горячих трещин. Сварку выполняют в диапазоне средних скоростей при наибольшей удельной мощности луча. Некоторые режимы сварки приведены в табл. 27.

27. Режимы электронно-лучевой сварки стали 12Х18Н9Т

Толщина, мм	Режим сварки: Ускоряющее напряжение, кВ	Сила тока луча, А	Скорость сварки, м/ч	Ориентировочная ширина шва, мм
1,5	18—20	50—60	60—70	2
1,0		240		4
20	20—22	270	50	7
35		500		—

Диффузионная сварка в вакууме

Диффузионная сварка в вакууме жаропрочных аустенитных сталей наиболее применима для изготовления тонколистовых конструкций, не допускающих коробления, и для материала с ограниченным легированием элементами, повышающими стойкость против образования горячих трещин. Диффузионную сварку можно выполнять без промежуточных прослоек и с промежуточными прослойками, находящимися при температуре сварки в твердом или жидком состоянии.

В связи с отсутствием в процессе сварки плавления и кристаллизации основного металла опасность возникновения горячих трещин уменьшается. Температуру сварки рекомендуют выбирать в интервале, в котором деформационная способность сплавов превышает деформацию, получаемую в процессе диффузионной сварки для обеспечения плотного контакта поверхностей. Для определения температуры сварки используют диаграммы технологической пластичности жаропрочных сплавов, на основании которых считают целесообразным работать в интервале температур 1100—1200° С.

Легирующие элементы — хром, алюминий и титан, имеющиеся в составе жаропрочных сплавов и образующие устойчивые окисные пленки, влияют на выбор температуры и давления при диффузионной сварке. Лучшие результаты получают при высоком вакууме ($> 1 \cdot 10^{-4} \div 1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.), что снижает производительность процесса.

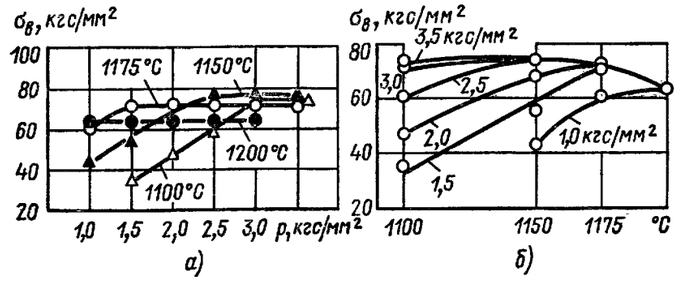


Рис. 9. Влияние давления сжатия (*а*) и температуры процесса (*б*) на прочность диффузионных соединений из сплава ЭИ602

Удалению прослоек и снижению разряжения способствует применение химической очистки соединяемых поверхностей или самофлюсующихся расплавляемых металлических прослоек. Перерыв между подготовкой поверхности и сваркой должен быть минимальным, так как он влияет на стабильность прочности сварных соединений.

Влияние давления сжатия и температуры процесса на прочность диффузионных соединений из сплава ХН75МБТЮ (ЭИ602) при продолжительности процесса 6 мин приведено на рис. 9. Увеличение продолжительности процесса свыше 6 мин приводит к росту зерна.

При диффузионной сварке тонколистовых конструкций основная трудность заключается в выборе материала приспособления, так как керамические материалы допускают давление до 3,0 кгс/мм², а тугоплавкие металлы вызывают потери энергии на нагрев приспособлений. Для уменьшения давления сжатия до 1,0 кгс/мм² применяют промежуточные нерасплавляющиеся никелевые прослойки толщиной 0,1 мм и менее и расплавляющиеся прослойки. Длительная прочность диффузионного соединения повышается с уменьшением толщины никелевой прослойки. Жидкая прослойка при сжатии почти полностью выдавливается из стыка, поэтому при малых давлениях применение расплавляемых прослоек является перспективным.

Контактная сварка

Термическое воздействие на металл при сварке вызывает протекание процессов, определяющих свойства сварных соединений. Свойства материалов и характер их изменения в процессе сварки определяют основные требования к параметрам режима. При точечной сварке с увеличением коэффициента линейного расширения повышается склонность к короблению, которое снижается при цикле с ковочным усилием. Пределы текучести и пластичности металла определяют интенсивность пластической деформации. Большее сопротивление деформации и большую чувствительность к выплеску имеют жаропрочные стали и сплавы. Коррозионно-стойкие стали, не стабилизированные титаном или ниобием, для предупреждения обеднения границ зерен хромом и возникновения межкристаллитной коррозии целесообразно сваривать на более жестких режимах.

При сварке оплавлением большое значение имеют процессы окисления и возникновения твердых окислов, которые трудно удалить из зоны сварки при осадке, особенно при небольшой толщине жидкого слоя и быстрой его кристаллизации. Кроме того, сплавы с большим интервалом кристаллизации и повышенной жаропрочностью склонны к образованию усадочных рыхлот и горячих трещин.

Точечной и шовной сваркой соединяют детали толщиной 0,05—6 мм. Зазоры между соединяемыми деталями должны быть минимальными и для сталей и легированных сплавов толщиной 1 мм не превышать 0,4 мм на длине 100 мм и 1,2 мм на длине 300 мм. При толщине металла 1 мм зазоры уменьшаются до 0,3 и 0,9 мм соответственно. Свариваемые поверхности деталей из коррозионно-стойких, жаропрочных сталей и сплавов подготовляют с помощью химического травления или, в ответственных деталях, с помощью электролитического полирования. Для качественной сварки большое значение имеют состояние рабочей поверхности и нагрев электродов. Например, при точечной сварке коррозионно-стойкой стали с увеличением толщины от 0,8 до 3 мм количество тепла, выделившегося на электродах, возрастает с 18 до 40% от общего тепла при сварке. Поэтому при сварке коррозионно-стойких и жаропрочных сталей для электродов используют бронзу БрНБТ (ТУ 1029—62), стойкость которой при толщине этих сталей 1,5 мм составляет 7—8 тыс. точек, а при роликовой сварке — 750 м шва. Размеры электродов в зависимости от толщины изделия приведены в табл. 28.

Низкая тепло- и электропроводность аустенитных сталей вызывает необходимость применения более жестких, чем для низколегированных сталей, режимов сварки (табл. 29—32). Повышенная прочность этих сталей требует увеличения

усилия сжатия электродов при сварке, а высокая термическая стабильность допускает применение простейших циклов сварки, которые обеспечивают достаточную прочность соединения (табл. 33).

28. Рекомендуемые размеры (мм) электродов для точечной и шовной сварки жаростойких и коррозионно-стойких сталей

Толщина заготовок	Ширина ролика	Ширина рабочей поверхности	Диаметр электрода	Диаметр рабочей поверхности	Радиус рабочей поверхности
0,5 + 0,5	6	4	12	4,0	25—50
1 + 1	10	5		5,0	75—100
1,5 + 1,5	12	7	16	7,0	100—150
2 + 2	15	8	20	8,0	
2,5 + 2,5	18	9		9,0	150—200
3 + 3	20	10	25	10	

29. Расчетные режимы точечной сварки деталей из аустенитной стали

Толщина деталей, мм	Сварочный ток, кА	Усилие сжатия, кгс	Время сварки, с
0,5	4,1	23	0,08
0,6	4,7	30	0,10
0,8	5,0	37	0,12
1,0	6,0	46	0,14
1,2	6,5	55	0,16
1,6	7,5	66	0,18
2,0	8,0	91	0,24
2,5	9,5	115	0,30
3,0	10,5	150	0,36

30. Расчетные режимы шовной сварки деталей из аустенитной стали

Толщина деталей, мм	Сварочный ток, кА	Усилие сжатия, кгс	Время сварки, с
0,5	7,5	31	0,02
0,6	8,5	40	0,02
0,8	9,5	50	0,04
1,0	11,0	62	0,06
1,2	12,0	75	0,08
1,6	13,5	90	0,10
2,0	15,0	125	0,12
2,5	17,0	100	0,16
3,0	19,5	200	0,24

31. Режимы прерывистой шовной сварки аустенитной стали

Толщина деталей, мм	Ширина контактной поверхности, мм	Усилие сжатия, кгс	Время включения тока, с	Приблизительное число прерываний: в секунду	Приблизительное число прерываний: на 1 м шва	Скорость сварки, м/мин	Сила тока, А	Примерный шаг точек, мм
0,1 + 0,1	3	60	0,02	25	1000	1,5	2000	1
0,2 + 0,2		80					2500	
0,3 + 0,3	4	100	0,04	16	640		3000	1,5
0,4 + 0,4		120		12,5			3500	
0,5 + 0,5	5	150		10	500	1,2	4000	2
0,6 + 0,6	6	180	0,06		600		4200	1,6
0,8 + 0,8		200					4500	
1 + 1	7	270	0,08	8,3	500	1,0	5000	2
1,2 + 1,2		350		6,2	370		6000	2,7

32. Режимы точечной сварки деталей неравной толщины из стали 12Х18Н9Т на конденсаторной машине МТК-75

Толщина деталей, мм	Радиус сферы электродов, мм	Усилие сжатия электродов, кгс	Ток, А	Длительность протекания тока, с		Емкость батареи, мкФ	Напряжение конденсаторов, В
				$t_м$	T		
0,3 + 4	25/200	250	8300	0,01	0,034	16 800	230
0,5 + 2	25/100	300	8700		0,036		
0,5 + 4	25/200		9200		0,038		260
0,5 + 2 + 0,5	25/25		9300		0,036		240
0,8 + 4	50/200	500	9800	0,012	0,042	25 200	230

33. Средние разрушающие усилия на срез сварных точек для соединений из стали 12Х18Н9Т

Толщина тонкой детали, мм	Средний диаметр ядра, мм	Разрушающее усилие, кгс	Толщина тонкой детали, мм	Средний диаметр ядра, мм	Разрушающее усилие, кгс
0,3	3	140	1,2	5,5	950
0,5	3,5	240	1,5	6,5	1380
0,8	4	485	2	7,7	1930
1	4,5	700	3	9,7	3050

Стыковая сварка оплавлением обеспечивает хорошее качество соединений деталей из аустенитных сталей при интенсивном оплавлении перед осадкой и большой скорости осадки в связи с образованием на оплавленной поверхности тугоплавких окислов хрома. Конечная скорость оплавления должна быть не менее 5—6 мм/с, а скорость осадки не менее 50 мм/с при давлении осадки в 2—3 раза выше, чем при сварке низкоуглеродистой стали.

Хромоникелевые стали в зависимости от роста твердости стали сваривают при низких (45Х14Н14В2М, 09Х14Н16Б, 09Х14Н19В2БР и др.), средних (12Х18Н9Т, 12Х18Н12М2Т и др.) и высоких параметрах осадки. Процесс сварки ведут непрерывным оплавлением и оплавлением с подогревом для обеспечения требуемой деформации в зависимости от свойств материала. Сварка непрерывным оплавлением обеспечивает более стабильное качество соединений, чем сварка с подогревом.

Наклепанные и сигматизированные стали сваривают при более жестких режимах, чем чисто аустенитные; кроме того, имеет значение сечение свариваемых деталей. При сварке полос повышенное охлаждение расплавленного слоя на торцах обусловливает увеличение скорости оплавления при скорости осадки не менее 60—80 мм/с (табл. 34) и минимальной осадке (0,8—1,5) δ. Шунтирование тока и деформации при сварке деталей типа колец требуют увеличения мощности на 15—20% и подогрева кольца в машине для облегчения деформации (табл. 35).

Сварные соединения аустенитной стали характеризуются наличием зоны повышенной травимости, обусловленной деформацией зерен или наличием α-фазы, и в некоторых сталях (09Х14Н16Б, 1Х24Н14В2М и др.) узкой полоской аустенита в стыке с равномерно распределенными карбидами. Последующий нагрев в машине до 1200° С с выдержкой 1—3 мин обеспечивает растворение выделившейся фазы и выравнивание структуры соединения без существенного изменения прочности. Однако склонность к межкристаллитной коррозии соединений из сталей, не содержащих энергичных карбидообразователей, снижается и восстанавливается лишь после аустенизации.

34. Режимы сварки оплавлением полос из стали 12Х18Н9Т сечением 700×900 мм

Толщина, мм	$2l_0$	$\Delta_{опл}$	$\Delta_{ос}$	$\Delta_{ос.т}$	$u_{х.х}$, В	$v_{опл}$, мм/с
	мм					
1,5	15	8	2	1	8—10	3—4
5	38	18	5	3	10—12	2,5—3,5
10	45	20	7	4	12—14	2,5—3

Примечание. l_0 — установочная длина; $\Delta_{опл}$ — припуск на оплавление; $\Delta_{ос}$ — припуск на осадку; $\Delta_{ос.т}$ — припуск на осадку под током; $u_{х.х}$ — напряжение холостого хода источника; $v_{опл}$ — скорость оплавления.

35. Ориентировочные режимы сварки профильных колец из стали 12Х18Н9Т

Сечение, мм²	$2l_0$, мм	$u_{х.х}$, В	Подогрев, с		$\Delta_{опл}$, мм	$v_к$, мм/с	$t_{опл}$, с	$\Delta_{ос}$, мм	$\Delta_{ос.т}$, мм
			$t_{под}$	$t_{шмп}$					
875	70	7,5—8,0	30	5	16—18	3,5	35	8	6
1500	90	8,4—9,0	50	5	24—26	3,5	50	11	8
3215	120	9,0—9,5	70	6	34—36	3,5	75	15	11

Сварное соединение, выполненное при оптимальном режиме, имеет прочностные характеристики, близкие к характеристикам основного металла (табл. 36). Жаропрочность основного металла и сварного соединения при сварке большинства аустенитных сталей близки вследствие однородности химического состава различных зон соединения.

36. Прочность и пластичность соединений из стали 12Х18Н9Т, выполненных стыковой сваркой оплавлением

$\sigma_в$, кгс/мм²	δ, %	$a_н$, кгс · м/см²
58 / 60	40 / 40	10 / 13

Примечание. В числителе приведены механические свойства основного металла, в знаменателе — сварного соединения.

Рельефной сваркой соединяют детали, имеющие специальные выступы, с помощью электродов или плит из сплава БрНБТ с плоской рабочей поверхностью или детали типа стержней, втулок, штуцеров, гаек с листовыми деталями. В зависимости от формы цилиндрических деталей применяют электроды различной конструкции: плоские, полые и с фиксаторами. Проплавление листовой детали повышается при применении электродов из медно-вольфрамового спеченого материала, например марки АВМ-50. Сварку рекомендуют выполнять с плавным нарастанием тока для постепенного выравнивания площади контакта и исключения выплесков. Сварочный ток определяют из расчета 400—500 А на 1 мм² площади вершины рельефа, а усилие из расчета 4—6 кгс на 1 мм² площади основания рельефа (табл. 37).

При сварке деталей из жаропрочных сплавов применяют предварительный подогрев, в процессе которого рельеф несколько осаживается и контакт деталь — деталь стабилизируется, а также цикл сжатия с ковочным усилием. Качественные соединения получают при взаимном проплавлении деталей и образовании литой зоны глубиной 20% толщины и шириной не менее толщины листовой детали.

37. Режимы рельефной сварки стали 12Х18Н9Т

Толщина металла, мм	Размеры рельефа, мм		Нахлестка, мм	Усилие сжатия, кгс	Ток, кА	Длительность протекания тока, с
	$d_р$	$h_р$				
0,5	1,75	0,5	5	200	4	0,16
0,8	2,5	0,6	6	320	5,6	0,24
1	3	0,7	8	400	6,6	0,26
1,5	4	0,9	11	600	9	0,36
2	4,75	1	13	800	11	0,42
2,5	5,5	1	15	1000	12,5	0,46
3	7	1,5	18	1200	14	0,48

Сварка трением

Сварка трением также может быть использована при изготовлении деталей из аустенитных сталей. Известны несколько схем процесса сварки трением, в которых использовано либо вращение, либо колебательное перемещение одной из свариваемых деталей относительно другой. Технология сварки характеризуется скоростью вращения (перемещения) детали, давлением при нагреве и осадке (сварке) и величиной осадки. Например, при сварке деталей диаметром 127/107 мм из стали 12Х18Н9Т частота вращения детали 900 об/мин, давление при нагреве 4,6 кгс/мм², а при давлении 17 кгс/мм², осадка 7 мм, общее машинное время сварки 30 с. Контроль процесса осуществляют по времени.

Список литературы

1. **Акулов А. И., Бельчук Г. И., Демянцевич В. П.** Технология и оборудование сварки плавлением. М., «Машиностроение», 1977. 432 с.
2. **Горячие** трещины при сварке жаропрочных сплавов. М., «Машиностроение», 1973. 224 с. Авт.: М. Х. Шоршоров и др.
3. **Кабанов Н. С., Слепак Э. Ш.** Технология стыковой контактной сварки. М., «Машиностроение», 1970. 264 с.
4. **Казаков Н. Ф.** Диффузионная сварка в вакууме. М., «Машиностроение», 1968. 332 с.
5. **Каховский Н. И., Фортушный В. Г., Ющенко К. А.** Электродуговая сварка сталей. Справочник. Киев, «Наукова думка», 1974. 479 с.
6. **Любавский К. В., Тимофеев М. М.** Дуговая сварка аустенитных жаропрочных сталей. М., «Машиностроение», 1968. 148 с.
7. **Потапьевский А. Г.** Сварка в защитных газах плавящимся электродом. М., «Машиностроение», 1974. 240 с.
8. **Рыськова З. А.** Трансформаторы для электрической контактной сварки. Л., «Энергия», 1975. 280 с.
9. **Справочник** по сварке. Под ред. А. И. Акулова. Т. 4. М., «Машиностроение», 1971. 416 с.
10. **Справочник** сварщика. Под ред. В. В. Степанова. М., «Машиностроение», 1974. 520 с.
11. **Технология** и оборудование контактной сварки. Под ред. Б. Д. Орлова. М., «Машиностроение», 1975. 536 с.
12. **Технология** электрической сварки металлов и сплавов плавлением. Под ред. Б. Е. Патона. М., «Машиностроение», 1974. 768 с.
13. **Химушин Ф. Ф.** Нержавеющие стали. М., «Металлургия», 1967. 798 с.
14. **Чулошников П. Л.** Точечная и роликовая электросварка легированных сталей и сплавов. М., «Машиностроение», 1968. 200 с.

Глава 10

СВАРКА АЛЮМИНИЯ, АЛЮМИНИЕВЫХ И МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

СВАРКА АЛЮМИНИЯ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Основные свойства и особенности сварки

Алюминиевые сплавы используют в сварных конструкциях различного назначения. Основными достоинствами их как конструкционных материалов являются малая плотность, высокая удельная прочность, высокая коррозионная стойкость.

Чистый алюминий, ввиду низкой прочности, для изготовления конструкций используют в отдельных случаях в химической, пищевой и электротехнической промышленности. Алюминий высокой чистоты применяют в отраслях новой техники, в том числе при производстве полупроводников. В качестве конструкционных материалов в основном используют полуфабрикаты из алюминиевых сплавов. По показателям отношения прочности и текучести к плотности высокопрочные алюминиевые сплавы значительно превосходят чугун, низкоуглеродистые и низколегированные стали, чистый титан и уступают лишь высоколегированным сталям повышенной прочности и сплавам титана (табл. 1).

1. Относительные показатели свойств различных материалов

Материал	Масса при постоянном объеме	Предел		
		прочности	текучести	выносливости
АМц	0,35	0,88	0,55	—
АМг6	0,34	2,45	1,95	—
Д16	0,352	3,2	3,83	1,44
М40	0,352	3,28	4,8	—
Низкоуглеродистая сталь 20	1	1	1	1
Низколегированная сталь 30ХГСА	1	2,62	3,4	3,12
Легированная сталь ВНС-2	0,98	2,98	4,4	2,0
Титан:				
чистый	0,57	0,94	0,86	—
технический	0,57	2,82	4,3	—
Сплав ОТ4	0,58	3,06	4,12	2,9

Алюминиевые сплавы разделяют на литейные и деформируемые по пределу растворимости элементов в твердом растворе (рис. 1). В сварных конструкциях в основном используют полуфабрикаты (листы, профили, трубы и др.) из деформируемых сплавов. Концентрация легирующих элементов деформируемых сплавов меньше предела растворимости, и при нагреве эти сплавы могут быть переведены в однофазное состояние, при котором обеспечивается их высокая деформационная способность.

Большинство элементов, входящих в состав алюминиевых сплавов, обладает ограниченной растворимостью, изменяющейся с температурой. Это сообщает сплавам способность упрочняться термической обработкой. В связи с этим деформируемые сплавы разделяют на сплавы, не упрочняемые термической обработкой (с концентрацией легирующих элементов ниже предела растворимости при 20° С),

и сплавы, упрочняемые термической обработкой (имеющие концентрацию легирующих элементов свыше этого предела).

К деформируемым сплавам [7], не упрочняемым термической обработкой, относятся технический алюминий АД1, АД, алюминиево-марганцевый сплав АМц (Al + 1,3% Mn) и группа сплавов системы Al—Mg: АМг1, АМг2, АМг3 и АМг6. В сварных соединениях эти сплавы способны сохранять до 95% прочности основного металла при высокой пластичности и высокой коррозионной стойкости.

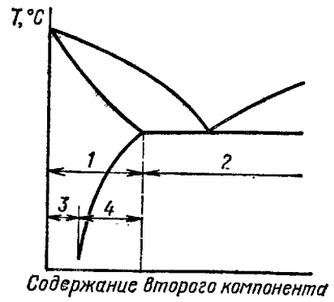


Рис. 1. Классификация алюминиевых сплавов по бинарной диаграмме:

1 — деформируемые; *2* — литейные; *3* — деформируемые, не упрочняемые термической обработкой; *4* — деформируемые, упрочняемые термической обработкой

Термически упрочняемые деформируемые алюминиевые сплавы могут быть разделены на несколько групп.

I. Дуралюмины — сплавы на основе системы Al—Cu—Mg: Д1, Д16, Д19, ВАД1, ВД17, М40, Д18.

II. Авиали — сплавы на основе системы Al—Mg—Si и Al—Cu—Mg—Si: АВ, АД31, АД33, АД35, АК6, АК6-1, АК8.

III. Сплавы на основе системы Al—Cu—Mg—Fe—Ni: АК2, АК4, АК4-1.

IV. Сплавы на основе системы Al—Cu—Mn: Д20, Д21 и ВАД-23 (Al—Cu—Mn—Li—Cd).

V. Сплавы на основе системы Al—Zn—Mg—Cu: В93, В95, В96, В94.

VI. Сплавы на основе системы Al—Mg—Zn: В92, В92Ц, АЦМ.

Из перечисленных сплавов к свариваемым относятся: АД, АД1, АМц, АМг, АМг3, АМг5В, АМг6, АВ, АД31, АД33, АД35, М40, Д20, ВАД1, В92Ц.

Для сварочных работ используют проволоку из алюминия и алюминиевых сплавов по ГОСТ 7871—75; типоразмеры и химический состав этой проволоки приведены в табл. 2 и 3.

2. Диаметр проволоки и предельные отклонения, мм (ГОСТ 7871—75)

Диаметр проволоки	Предельные отклонения по диаметру тянутой проволоки	Диаметр проволоки	Предельные отклонения по диаметру тянутой проволоки
0,80 0,90 1,00 1,12 1,25	−0,06	2 2,24 2,50 2,80 3,15	−0,08
1,40		3,55	
1,60 1,80	−0,08	4,00 4,50	0,096

В сварочной ванне алюминиевые сплавы взаимодействуют с газами и шлаками.

Металлургические особенности сварки алюминия и его сплавов определяются взаимодействием их с газами окружающей среды, интенсивностью испарения легирующих элементов, а также особенностями кристаллизации в условиях сварочного процесса.

При 1000° С реакция окисления алюминия может протекать при $p_{O_2} = 4{,}406 \cdot 10^{-46}$ кгс/см². Образующаяся окись алюминия покрывает поверхность деталей плотной и прочной пленкой. При 20° С процессы окисления алюминия

3. Химический состав сварочной проволоки из алюминиевых сплавов, % (ГОСТ 7871—75)

Марка сплава	Al	Mg	Mn	Fe	Si	Ti	Be	Zr
СвА97	Не менее 99,97	—	—	—	—	—	—	—
СвА85Т	Остальное	—	—	—	—	0,2—0,5	—	—
СвА5	Не менее 99,5	—	—	0,2—0,35	0,10—0,25	—	—	—
СвАМц	Остальное	—	1,0—1,5	0,3—0,5	0,2—0,4	—	—	—
СвАМг3	»	3,2—3,8	0,3—0,6	—	0,5—0,8	—	—	—
СвАМг4	»	4,0—4,8	0,5—0,8	—	0,05—0,25 Cr	0,05—0,15	0,002—0,005	—
СвАМг5	»	4,8—5,8	0,5—0,8	—	—	0,1—0,2	0,002—0,005	0,2—0,35
Св1557	»	4,5—5,5	0,2—0,6	—	—	0,07—0,15	0,002—0,005	—
СвАМг6	»	5,8—6,8	0,5—0,8	—	—	0,1—0,2	0,002—0,005	0,15—0,35
СвАМг63	»	5,8—6,8	0,5—0,8	—	—	—	0,0001—0,0003	0,002—0,4 0,12
СвАМг61	»	5,5—6,5	0,8—1,1	—	4,5—6,0	0,1—0,2	—	—
СвАК5	»	—	—	—	7,0—10,0	—	—	—
СвАК10	»	—	—	—	0,05—0,15 V	0,1—0,2	0,0001—0,0008	0,1—0,25
Св1201	»	6,0—6,8 Cu	0,2—0,4	—	—	—	—	—

протекают по параболическому закону (рис. 2). Важной характеристикой окисной пленки алюминия является ее способность адсорбировать газы, в особенности водяной пар. Последний удерживается окисной пленкой до температуры плавления металла.

Коэффициент теплового расширения окисной пленки почти в 3 раза меньше коэффициента расширения алюминия, поэтому при нагреве металла в ней образуются трещины. При наличии в алюминии легирующих добавок состав окисной пленки может существенно меняться. Возникающая сложная окисная пленка в большинстве случаев является более рыхлой, гигроскопичной и обладает худшими защитными свойствами.

Окисная пленка на поверхности алюминия и его сплавов затрудняет процесс сварки. Обладая высокой температурой плавления (2050° С), окисная пленка не расплавляется в процессе сварки и покрывает металл прочной оболочкой, затрудняющей образование общей ванны. Вследствие высокой адсорбционной способности к газам и парам воды окисная пленка является источником газов, растворяющихся в металле, и косвенной причиной возникновения в нем несплошностей различного рода. Частицы окисной пленки, попавшие в ванну, а также часть пленок с поверхности основного металла, не разрушенных в процессе сварки, могут образовывать окисные включения в швах, снижающие свойства соединений и их работоспособность.

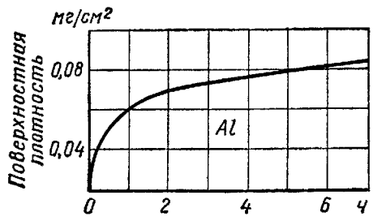


Рис. 2. Кинетическая зависимость окисления алюминия при 20° С

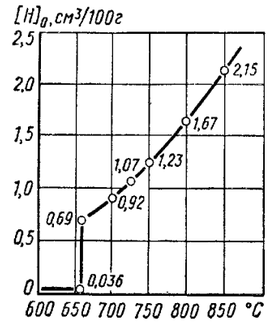


Рис. 3. Изменение растворимости водорода в алюминии при различных температурах и парциальном давлении p_{H_2} = = 1 кгс/см²

Для осуществления сварки должны быть приняты меры по разрушению и удалению пленки и защите металла от повторного окисления. С этой целью используют специальные сварочные флюсы или сварку осуществляют в атмосфере инертных защитных газов. Вследствие большой химической прочности соединения Al_2O_3 восстановление алюминия из окисла в условиях сварки практически невозможно. Не удается также связать Al_2O_3 в прочные соединения сильной кислотой или основанием. Поэтому действие флюсов для сварки алюминия основано на процессах растворения и смывания диспергированной окисной пленки расплавленным флюсом. В условиях электродуговой сварки в интертных защитных газах удаление окисной пленки происходит в результате электрических процессов, происходящих у катода (катодное распыление). В этих условиях возникает необходимость повышения требований к качеству предварительной обработки деталей перед сваркой с целью получения тонкой и однородной пленки по всей поверхности свариваемых кромок. Для предупреждения дополнительного окисления и засорения ванны окислами необходимо применять защитный газ высокой чистоты.

Водород, в отличие от других газов, обладает способностью растворяться в алюминии и при определенных условиях образовывать поры в металле швов.

Растворимость водорода в алюминии изменяется при различных температурах (рис. 3). Концентрация растворенного в металле водорода $[H]_р$ зависит от давления p_{H_2} молекулярного водорода, находящегося с ним в равновесии:

$$[H]_р = K\sqrt{p_{H_2}}\, e^{-\frac{Q}{2RT}},$$

где Q — молярная удельная теплота растворения водорода в металле, кал/моль; R — универсальная газовая постоянная, кал/(моль·К); K — константа, зависящая от температуры.

В реальных условиях парциальное давление молекулярного водорода в газовой фазе дуги ничтожно мало. Поэтому основным источником водорода, растворяющегося в сварочной ванне, является реакция взаимодействия влаги, содержащейся в окисной пленке, с металлом:

$$2Al + 3H_2O = Al_2O_3 + 6H.$$

В результате протекания этой реакции концентрация атомарного водорода в поверхностном слое атмосферы, контактирующей с металлом, может соответствовать большому давлению молекулярного водорода, находящегося в равновесии с металлом. Поэтому при наличии паров воды в зоне ванны концентрация растворенного в металле водорода может оказаться намного больше равновесной. При охлаждении растворенный водород в связи с понижением растворимости стремится выделиться из металла. Пузыри выделяющегося водорода, не успевая всплыть из ванны, остаются в шве, образуя поры. Поэтому основной мерой борьбы с пористостью при сварке алюминия является снижение концентрации растворенного в нем водорода до предела ниже 0,69—0,7 см³/100 г металла [3].

Основным источником водорода, растворяющегося в металле шва при аргонодуговой сварке, является влага, адсорбированная поверхностью металла и входящая в состав окисной пленки в виде гидратированных окислов. Количество ее определяется состоянием поверхности металла и зависит от обработки его перед сваркой.

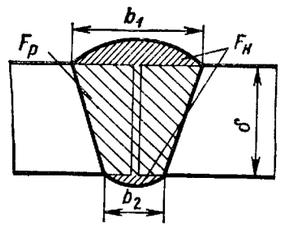


Рис. 4. Схема поперечного сечения однопроходного сварного шва

4. Выделение водорода с единицы поверхности алюминия при нагреве

Подготовка поверхности	a, см³/см²	
	для основного металла	для проволоки
Травление:		
в растворе ортофосфорной кислоты	0,0008	0,001
в щелочной ванне с осветлением в азотной кислоте	0,00165	0,0018
Зачистка поверхности проволочной щеткой	0,004	—
Электрополирование поверхности	—	0,00022

Коэффициенты a, характеризующие объем водорода в куб. см, выделяющегося с 1 см² поверхности алюминиевой проволоки и фольги при нагреве после различной обработки их перед сваркой и хранения до 1 суток, приведены в табл. 4.

Пользуясь коэффициентами a, можно рассчитать концентрацию водорода в металле швов и оценить вероятность появления в нем пор. Для однопроходного шва (рис. 4) концентрация водорода в шве

$$[H]_ш = \frac{(b_1 + b_2 + 2\delta)\, a_1 + 4\left(\frac{F_н}{d}\right) a_2}{F_ш \gamma} \cdot 100 + \frac{F_р}{F_ш}[H]_{ос} + \frac{F_н}{F_ш}[H]_{пр},$$

где $[H]_{ос}$ и $[H]_{пр}$ — концентрация водорода в основном металле и проволоке; $F_ш = F_п + F_н$ — площадь сечения шва; a_1 и a_2 — коэффициенты, характеризующие объем водорода, выделяющегося с 1 см^2 поверхности основного металла и проволоки и растворяющегося в сварочной ванне, см^3/см^2; γ — плотность металла, г/см^3.

Предупреждению пористости при сварке алюминия может способствовать сокращение удельной поверхности присадочной проволоки за счет увеличения ее диаметра и уменьшения доли участия присадочного металла в образовании шва. Рациональную обработку поверхности проволоки и основного металла применяют с целью уменьшения толщины окисной пленки и запаса имеющейся в ней влаги.

Магний увеличивает растворимость водорода в алюминии, поэтому повышенная склонность к пористости при сварке алюминиево-магниевых сплавов объясняется другим механизмом образования пор. На поверхности сплавов, содержащих магний, присутствует окисная пленка, состоящая из окислов Al_2O_3 и MgO. Такая пленка имеет большую толщину, меньшую плотность из-за дефектов ее строения и больший запас влаги, чем пленка из Al_2O_3. В процессе сварки при расплавлении основного и присадочного металлов часть влаги, содержащейся во внутренних дефектах пленки, не успевает прореагировать. Попадающие в ванну частицы пленки содержат остатки влаги, которая разлагается с выделением водорода. Образовавшийся водород в дефектах пленки переходит в молекулярную форму и затем выделяется в жидком металле ванны в виде пузырьков, минуя стадию растворения.

При таком механизме образования пор их суммарный объем (см^3/100 г) зависит от запаса влаги в пленке и времени существования ванны, т. е. времени, в течение которого пузырек может беспрепятственно развиваться в объеме

$$\Sigma V_п = \frac{k\,(S_о a_1 + S_{пр} a_2)}{F_ш \gamma}\,100,$$

где $S_о$ и $S_{пр}$ — площади поверхности основного и присадочного металла, участвующие в образовании шва; k — коэффициент, зависящий от погонной энергии, определяющий время существования сварочной ванны.

При таком механизме образования пор в качестве мер уменьшения пористости, кроме обычных, связанных с применением рациональной обработки поверхности проволоки и основного металла, а также сокращения удельной поверхности проволоки, участвующей в образовании шва, эффективной мерой борьбы с пористостью становится ужесточение режимов. Однако при ужесточении режимов возникает опасность увеличения давления водорода в несплошностях, что затрудняет выполнение многослойных швов и подварку.

Кристаллическая структура металла шва определяет его механические свойства. Чистый алюминий при кристаллизации обладает способностью образовывать в металле швов грубую крупнокристаллическую структуру.

При сварке алюминиевых сплавов кристаллическая структура и механические свойства металла швов могут изменяться в зависимости от состава сплава, используемого присадочного металла, способов и режимов сварки. Для всех способов сварки характерно наличие больших скоростей охлаждения и направленного отвода тепла. При кристаллизации в этих условиях часто развивается дендритная ликвация, что приводит к появлению в структуре металла эвтектики. Эвтектика снижает пластичность и прочность металла. В связи с этим в швах возможно возникновение кристаллизационных трещин в процессе кристаллизации.

Улучшение кристаллической структуры металла швов при сварке алюминия и некоторых его сплавов может быть достигнуто модифицированием в процессе сварки. Поэтому в качестве присадочного металла при сварке все большее применение находят специальные проволоки с добавками модификаторов (Zr, Ti, B). Введение этих элементов в небольших количествах позволяет улучшить кристаллическую структуру металла швов и снизить их склонность к трещинообразованию. Перемешивание металла сварочной ванны в процессе сварки с помощью внешнего магнитного поля также снижает склонность металла швов к трещинообразованию.

При выборе присадочного металла следует также учитывать возможность появления в структуре металла швов различных химических соединений. При сварке сплавов алюминия, содержащих магний, с применением присадочной проволоки, содержащей кремний, в металле швов и особенно в зоне сплавления появляются иглообразные выделения Mg_2Si, снижающие пластические свойства сварных соединений. Неблагоприятно влияют на свойства соединений из сплавов системы Al—Mg ничтожно малые добавки натрия, которые могут попадать в металл шва через флюсы.

Свойства сварных соединений зависят также от процессов, протекающих в околошовных зонах. При сварке чистого алюминия и сплавов, неупрочняемых термической обработкой, в зоне теплового воздействия наблюдается рост зерна и некоторое их разупрочнение, вызванное снятием нагартовки. Рост зерна и разупрочнение нагартованного металла при сварке изменяется в зависимости от способа сварки, режимов и степени предшествовавшей нагартовки сплава. Свариваемость сплавов Al—Mg осложняется повышенной чувствительностью их к нагреву и склонностью к образованию пористости и вспучиванию в участках основного металла, непосредственно примыкающих к шву. Способность этих сплавов образовывать пористость в зонах термического воздействия связывается с наличием в слитках молекулярного водорода. После обработки таких слитков (прессования или прокатки) в металле образуются несплошности в виде каналов или коллекторов, в которых водород находится под высоким давлением. Для проверки качества металла, предназначенного для сварки, рекомендуется проводить специальную пробу [3].

При сварке сплавов, упрочняемых термической обработкой, в зонах около шва происходят изменения, ухудшающие свойства свариваемого металла. Измерение твердости и изучение структуры металла в зоне термического воздействия сплавов этой группы позволяют обнаружить в ней участки металла с различной степенью распада твердого раствора и коагуляции упрочнителя. Однако самым опасным изменением, резко ухудшающим свойства металла и способствующим образованию трещин, является оплавление границ зерен. Появление жидких прослоек между зернами снижает механические свойства металла в нагретом состоянии и способствует образованию кристаллизационных трещин.

Независимо от способа сварки и исходного состояния металла в непосредственной близости от шва наблюдается зона оплавления границ зерен. Ширина этой зоны меняется в зависимости от способа и режимов сварки. Наиболее широкая зона появляется при газовой сварке и более узкая — при способах сварки с жестким термическим воздействием. Распределение эвтектики в этой зоне изменяется в зависимости от исходного состояния сплава. В сварных соединениях, полученных при сварке закаленного сплава, эвтектика располагается в виде сплошной прослойки вокруг зерен, в то время как в соединениях из отожженного металла в залегании эвтектики появляются несплошности. Последующей термической обработкой не удается восстановить свойства металла в зоне, прилежащей к шву, что приводит к большому изменению прочности соединений и делает ненадежными эти соединения в эксплуатации.

Сплавы Д20, ВАД1, М40 и др. имеют лучшую свариваемость. Особенно перспективными являются самозакаливающиеся сплавы тройной системы Al—Mg—Zn. При сварке этих сплавов удается получить соединения с прочностью 80—90% прочности основного металла в закаленном и состаренном состоянии.

Алюминий и его сплавы отличаются высокой тепло- и электропроводностью, что вызывает необходимость применения больших токов и мощных машин для электроконтактной сварки, особенно при точечной сварке этих материалов. Для повышения эффективности нагрева и плавления целесообразно сваривать эти металлы при малой длительности импульсов тока или на больших скоростях при сварке плавлением.

Сварные конструкции из алюминия и его сплавов склонны к короблению, что объясняется относительно высоким коэффициентом теплового расширения (табл. 5).

5. Теплофизические свойства алюминия и некоторых других металлов при температуре 0—100 °С

Свойства	Al	Fe	Cu	Mg
Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^4$, 1/°С	0,24	0,12 0,17	0,16	0,29
Коэффициент теплопроводности, кал/(см · с · °С)	0,503	0,11	0,92	0,38
Удельная массовая теплоемкость, кал/(г·°С)	0,22		0,10	0,26
Электрическое сопротивление, мкОм	2,7	10	1,7	4,3

Снижение деформаций в конструкциях может быть достигнуто за счет использования технологических мероприятий (выбор соответствующего способа сварки, подбор оптимальных режимов, подогрев, рациональный порядок наложения швов и др.).

Технология сварки

Подготовка под сварку. При подготовке деталей из алюминиевых сплавов под сварку профилируют свариваемые кромки, удаляют поверхностные загрязнения и окислы. Обезжиривание и удаление поверхностных загрязнений осуществляют с помощью органических растворителей [8] (табл. 6) или обработкой в специальных ваннах щелочного состава.

В качестве растворителей для обезжиривания деталей из алюминиевых сплавов применяют уайт-спирит, технический ацетон, растворители РС-1 и РС-2. Обезжиривание алюминиевых сплавов можно проводить в водном растворе следующего состава: 40—50 г/л технического тринатрийфосфата ($Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$), 40—50 г/л кальцинированной соды (Na_2CO_3), 25—30 г/л жидкого стекла (Na_2SiO_3). Температура ванны 60—70° С, время обработки 4—5 мин. Удаление поверхностной окисной пленки является наиболее ответственной операцией подготовки деталей. При этом в основном удаляют старую пленку окислов, полученную в результате длительного хранения и содержащую значительное количество адсорбированной влаги.

Окисную пленку можно удалять с помощью металлических щеток из проволоки диаметром 0,1—0,2 мм при длине ворса не менее 30 мм или шабрением. После зачистки кромки вновь обезжиривают растворителем. Продолжительность хранения деталей перед сваркой после зачистки 2—3 ч. При более широких масштабах производства поверхности деталей подвергают травлению. Широко применяют травление в щелочных ваннах по следующей технологии: 1) обезжиривание в растворителе; 2) травление в ванне из водного раствора 45—50 г/л NaOH; температура ванны 60—70° С; время травления 1—2 мин для неплакированных материалов; при необходимости снятия технологической плакировки (например, на сплаве АМг6) время травления выбирают из расчета 0,01 мм за 2,5—3 мин; 3) промывка в проточной горячей воде (60—80° С), затем в холодной воде; 4) осветление в 30%-ном водном растворе HNO_3 при 20° С в течение 1—2 мин или в 15%-ном водном растворе HNO_3 при 60° С в течение 2 мин; 5) промывка в холодной проточной воде, затем в горячей (60—70° С); 6) сушка горячим воздухом (80—90° С).

При сварке деталей из сплавов алюминия, содержащих магний повышенной концентрации (например, сплава АМг6), перед сваркой кромки деталей и особенно их торцовые поверхности необходимо зачищать шабером. Для обработки электродной проволоки из алюминиевых сплавов используют те же ванны. Во многих случаях для обработки присадочной проволоки после травления рекомендуется проводить электрохимическое полирование, особенно для сплавов, содержащих магний. В качестве электролита используют раствор состава: 700 мл ортофосфорной кислоты H_3PO_4, 300 мл серной кислоты H_2SO_4, 42 г окиси хрома CrO_3. В процессе полирования проволоки температуру электролита поддерживают 95—100° С. При перегреве электролита свыше 100° С происходит растравливание поверхности, а при понижении температуры ниже 90° С процесс полирования прекращается. Качество подготовки проволоки контролируют наплавкой технологических валиков с последующей оценкой пористости металла шва путем взвешивания.

Перед контактной сваркой (точечной и шовной) нахлесточные поверхности в некоторых случаях дополнительно зачищают вращающимися металлическими щетками. При соединении листов толщиной свыше 2,5—3 мм плакированный слой удаляют глубоким травлением для предотвращения образования непроваров. Торцы деталей перед стыковой контактной сваркой подвергают механической обработке резанием, например, на металлорежущих станках.



Рис. 5. Конструкция подкладки для сварки алюминиевых сплавов

Поверхности деталей, свариваемых контактной точечной или шовной сваркой, контролируют внешним осмотром или измерением при 20° С электрического сопротивления образцов-свидетелей или самих деталей. При удовлетворительном состоянии поверхностей электрическое сопротивление не должно превышать 120 мкОм. Более объективное представление о свойствах поверхностей дает сопротивление деталей в процессе сварки, которое можно оценить по скорости нарастания напряжения, снимаемого с электродов, на начальной стадии процесса сварки, например, спустя 0,01—0,02 с после включения тока.

Типы соединений. Основные типы соединений, применяемые при сварке деталей из алюминиевых сплавов, регламентированы ГОСТ 14806—69. При сварке плавлением алюминиевых сплавов наиболее рациональным типом соединений являются стыковые, выполнить которые можно любыми способами сварки. Для устранения окисных включений в металле швов применяют подкладки с канавкой рациональной формы (рис. 5) или разделку кромок с обратной стороны шва, что в некоторых случаях обеспечивает удаление окисных включений из стыка в формирующую канавку или в разделку.

Применение при аргонодуговой сварке флюсов, наносимых на торцовые поверхности перед сваркой в виде дисперсной взвеси фторидов в спирте, также способствует уменьшению количества окисных включений в металле шва.

При разделке кромок угол их раскрытия необходимо ограничивать с целью уменьшения объема наплавленного металла в соединении, а следовательно, и вероятности образования дефектов. Конкретный выбор конструктивных элементов подготовленных кромок свариваемых деталей, их размеров и размеров выполненных швов для основных типов соединений должен производиться согласно ГОСТ 14806—69.

Для точечной и шовной контактной сварки характерны нахлесточные соединения, размеры которых установлены ГОСТ 15878—70. При этом соотношение толщин свариваемых деталей, как правило, не превышает 1 : 2. Для стыковой сварки оплавлением используются стыковые соединения. Форма деталей должна обеспечивать надежное закрепление их в зажимах машины и токоподвод вблизи стыка. Площади сечения деталей в зоне соединения должны быть приблизительно одинаковыми. При сварке алюминия и его сплавов используют несколько способов сварки.

Газовая сварка. При сварке алюминиевых сплавов рекомендуется применять пламя газовой смеси $O_2 : C_2H_2 = 1{,}1 \div 1{,}2$. Мощность пламени выбирают в зависимости от толщины свариваемого металла:

Толщина металла, мм	0,5—0,8	1,0	1,2	1,5—2,0	3,0—4,0
Мощность пламени ацетилена, л/ч	50	75	75—150	150—300	300—500

Для защиты металла от окисления и удаления окислов с кромок свариваемых деталей применяют специальные флюсы. Наиболее распространен флюс АФ-4А состава: 28% NaCl, 50% KCl, 14% ZiCl, 8% NaF. При сварке флюс вводится или с присадочным прутком, или предварительно наносится на кромки в виде пасты, разведенной в воде. Хранить флюс длительное время (более 8—10 ч) в разведенном состоянии нельзя. В качестве присадочного металла применяют сварочную проволоку из алюминия или его сплавов. Диаметр присадочной проволоки зависит от толщины свариваемого металла:

Толщина металла, мм	До 1,5	Св. 1,5 до 3,0	Св. 3,0 до 5,0	Св. 5,0 до 7,0	Св. 7,0 до 10
Диаметр присадочной проволоки, мм	1,5—2	2,5—3	3—4	4—4,5	4,5—5,5

Ручную электродуговую сварку алюминия и его сплавов можно осуществлять угольным или металлическим покрытым электродом. Сварку угольным электродом применяют для заварки брака отливок, сварки алюминиевых шин, иногда для сварки тонкого материала по отбортовке. При этом используют присадочный материал в виде прутков, покрытых флюсом. Сварку угольной дугой ведут на постоянном токе прямой полярности. В качестве электродов можно применять угольные или графитовые стержни разных диаметров. Режимы сварки стыковых соединений из алюминия приведены в табл. 6.

6. Режимы сварки стыковых соединений из алюминия угольным и графитовым электродами

Толщина металла, мм	Ток, А	Диаметр, мм		
		присадочного прутка	угольного электрода	графитового электрода
2—5	120—250	4—6	12,5	10
5—10	250—400	5—6	15	12,5
10—15	400—500	6—8	18	15

Чаще применяют дуговую сварку покрытыми металлическими электродами, стержни которых изготовляют из сварочной проволоки (ГОСТ 7871—75) с нанесением на них покрытий из смеси хлористых и фтористых солей. В качестве связующего используют раствор хлористого натрия в воде или раствор декстрина, а также предложен водный раствор карбоксилметилцеллюлоза (КМЦ). Толщина слоя покрытия в зависимости от диаметра электродного стержня приведена в табл. 7.

7. Толщина покрытия в зависимости от диаметра электродного стержня, мм

Диаметр электродного стержня	Толщина покрытия на сторону	Диаметр электродного стержня	Толщина покрытия на сторону
3	0,25—0,3	5	0,5—0,75
4	0,3—0,5	6 и более	0,75—1,6

Электроды марок ОЗА-1 (табл. 8) со стержнем из проволоки СвА1 применяют для сварки алюминия, а электроды ОЗА-2 со стержнем из проволоки марки СвАК5 — для заварки брака отливок.

Сварку производят на постоянном токе обратной полярности (табл. 9).

Автоматическая электродуговая сварка по слою флюса производится плавящимся электродом и используется для стыковых соединений металла толщиной

от 4 мм и выше. Питание дуги осуществляется постоянным током обратной полярности. Состав флюсов, рекомендуемых для сварки по флюсу, приведен в табл. 10.

Ориентировочные режимы автоматической сварки по слою флюса приведены в табл. 11.

8. Состав электродных покрытий, %

Марка электродов	KCl	LiCl	NaF	NaCl	Остальные элементы
ОЗА-1	32,5	9,1	5,2	18,2	35
ОЗА-2	50	—	—	30	20% Na_3Al_6

9. Ориентировочные режимы ручной дуговой сварки алюминия и его сплавов покрытыми электродами

Толщина	Диаметр	Ток, А	Толщина	Диаметр	Ток, А
мм			мм		
До 3	3	80—130	8—10	6	300—350
3—5	4	150—80	8—15	8	350—400
5—8	5	250—320	15	10	400—450

10. Состав флюсов для автоматической сварки по слою флюса плавящимся электродом

Марка флюса	Свариваемый металл	Состав, части по массе			
		NaF	KCl	Na_3AlF_6	Остальные
МАТИ-1а	АМц	45	50	3	8 LiCl
МАТИ-10	АМг6	—	30	2	70 $BaCl_2$
АН-А1*	АМц	—	0,5	0,35	0,15 NaCl

* Состав в массовых долях.

11. Ориентировочные режимы автоматической электродуговой сварки алюминия плавящимся электродом по слою флюса

Толщина свариваемого металла	Диаметр электродной проволоки	Ток, А	Напряжение на дуге, В	Скорость сварки, м/ч
мм				
6	1,6	165—170	24—28	19,5—20
9	2,0	210—220	28—30	18,7
10		340	34—35	17,2
12		560	35—36	14,2
20	3,0	710	36—38	12,5
25		770	40—42	

Для соединения алюминия используют процесс автоматической дуговой сварки плавящимся электродом под слоем флюса. Для этого применяют флюсы с пониженной электропроводностью. Например, состав керамического флюса

ЖА-64 следующий: 30—44% криолита, 48—38% хлористого калия, 19—15% хлористого натрия, 3—3,5% кварцевого песка. Флюс замешивают на водном растворе карбоксилметилцеллюлозы (14—16% массы шихты), протирают через сито и прокаливают при 280—320° С в течение 6 ч. Сварку ведут чаще расщепленным электродом. В конструкциях, работающих в коррозионных средах, после сварки необходимо тщательно удалять остатки флюса.

Дуговую сварку в среде защитных газов широко используют для сварки алюминия и его сплавов. В качестве защитного газа применяют аргон чистотой не менее 99,9% (по ГОСТ 10157—73, сорта: высший, первый и второй) или смеси аргона с гелием. При сварке плавящимся электродом иногда применяют аргон с добавкой до 5% O_2.

Основным преимуществом процесса дуговой сварки вольфрамовым электродом в среде защитного газа является высокая устойчивость горения дуги. Благодаря этому процесс используется при сварке тонких листов. Питание дуги осуществляется переменным током от источников с падающими внешними характеристиками. Сварку ведут ручным или автоматическим способом. Для ручной сварки используют вольфрамовые электроды и присадочную проволоку в зависимости от толщины свариваемого металла:

Толщина свариваемого металла, мм	До 2	Св. 2—5	Св. 5
Диаметр присадочной проволоки, мм	1—1,5	1,5—3	3—4

Автоматическую сварку осуществляют без подачи или с подачей присадочной проволоки. При ручной сварке тонких листов неплавящимся электродом без присадки (по отбортовке) или с присадкой в один проход горелку перемещают с наклоном «углом вперед». Угол наклона горелки к плоской поверхности детали около 60°. Присадочная проволока подается под возможно меньшим углом к плоской поверхности детали.

При механизированной или автоматической сварке неплавящимся электродом горелка располагается под прямым углом к поверхности детали, а присадочная проволока подается таким образом, чтобы конец проволоки опирался на край сварочной ванны; скорость подачи меняется от 4—6 до 30—40 м/ч в зависимости от толщины материала. Ориентировочные режимы дуговой сварки вольфрамовым электродом приведены в табл. 12 и 13.

12. Ориентировочные режимы ручной аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом стыковых соединений алюминиевых сплавов

Толщина металла, мм	Встык с присадкой		По отбортовке	
	Ток, А	Расход газа, л/мин	Ток, А	Расход газа, л/мин
0,8	—	—	40—50	4—5
1,0	65—85	4—5	45—55	
1,2	70—90	5—6	55—70	5—6
1,5	80—100	7—8	70—85	7—8
2,0	90—110			
3,0	100—120	8—9	—	—

Для сварки алюминиевых сплавов также используют сварку вольфрамовым электродом импульсной дугой [5]. При этом можно сваривать алюминиевые сплавы толщиной от 0,2 мм и более. Имеются специализированные источники тока ИПКИ-100 и ИПКИ-350 для сварки импульсной дугой алюминисвых сплавов на переменном токе.

13. Ориентировочные режимы автоматической аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом стыковых соединений алюминиевых сплавов при напряжении на дуге 15—20 В

Сварка встык	Толщина металла, мм	Ток, А	Скорость сварки, м/ч	Диаметр электрода, мм	Расход газа, л/мин
Без присадки	1,0	40—70	25—50	1—1,5	5—6
	1,5	50—80	20—45	2	6—7
	2,0	80—120	20—40	2—3	7—8
	3,0	150—200	15—30	3—4	8—9
С отбортовкой кромок	0,8	30—60	15—60	1,0	4—5
	1,0	40—70	15—50	1—1,5	
	1,2	50—90	20—50	1,5—2	5—6
	1,5	60—110		2	6—7
С присадкой	1,0	60—100	20—40	1,5—2	5—6
	1,5	До 130	28—30	1,5—2	6—7
	2,0	110—140	18—26	2—3	7—8
	3,0	100—200	15—25	3—4	
	4,0	210—230	16—20	4	8—9

Расширение технологических возможностей при сварке металла больших толщин достигается за счет использования способа дуговой сварки вольфрамовым электродом погруженной дугой. Способ позволяет сваривать за один проход материал толщиной до 20 мм. При этом используют специальные вольфрамовые электроды с добавками иттрия и тантала и сварочные горелки с улучшенной защитой зоны сварки. При сварке погруженной дугой алюминиевых сплавов применяют источники питания типа ИПД-1000. Ориентировочные режимы однопроходной сварки погруженной дугой приведены в табл. 14.

14. Ориентировочные режимы однопроходной сварки вольфрамовым электродом погруженной дугой алюминиевых сплавов при расходе аргона 25—30 л/мин

Толщина металла, мм	Сварочный ток, А	Скорость сварки, м/ч	Диаметр вольфрамового электрода, мм
8	500—510	14	8
10	640—650	12	10
12		10	
14	670—680	8	
16	680—700	6	

Алюминиевые сплавы подвергают трехфазной дуговой сварке вольфрамовыми электродами. Возможности регулирования тепловложения при трехфазной дуговой сварке позволяют использовать ее для металла разных толщин. При трехфазной сварке за один проход успешно сваривают металл толщиной свыше 30 мм. Для трехфазной сварки применяют источники питания типа ИТД 600/1000.

Сварку плавящимся электродом в защитном газе используют для материала толщиной более 3 мм. Для питания дуги при сварке плавящимся электродом применяют источники постоянного тока с жесткой внешней вольтамперной характеристикой. Сварку ведут на токе обратной полярности, что обеспечивает надежное разрушение окисной пленки за счет катодного распыления и нормальное формирование швов. Сварку можно выполнять в полуавтоматическом или автоматическом режиме на подкладках с формирующей канавкой. Преимуществом процесса сварки плавящимся электродом является высокая производительность, возрастающая с увеличением толщины металла. Ориентировочные режимы автоматической и полуавтоматической дуговой сварки плавящимся электродом алюминиевых сплавов приведены в табл. 15 и 16.

При автоматической сварке используют сварочные автоматы типа АДСП-2 с постоянной, независимой от напряжения на дуге скоростью подачи проволоки.

Полуавтоматическая сварка плавящимся электродом возможна в различных пространственных положениях и позволяет заменить менее совершенный процесс сварки алюминиевых сплавов покрытыми электродами; при этом рекомендуются полуавтоматы с механизмом подачи тянущего типа.

15. Ориентировочные режимы автоматической аргонодуговой сварки плавящимся электродом алюминиевых сплавов (соединения встык)

Вид подготовки кромок	Толщина металла, мм	Сварочный ток, А	Скорость сварки, м/ч	Диаметр электродной проволоки, мм	Число слоев	Расход газа, л/мин
Без разделки	4	140—200 140—220	20—36	1,6—2	1	11—13
С V-образной разделкой	8 10	260—290 260—320	20—30 20—25	2—2,5	2	13—15
	15	290—375	18—22	2—3	2—3	15—17
С чашеобразной или Х-образной разделкой	20 > 20	290—390 300—420	15—21 9—18		3—4 4	

16. Ориентировочные режимы полуавтоматической сварки плавящимся электродом алюминиевых сплавов (соединения встык)

Вид подготовки кромок	Толщина металла, мм	Сварочный ток, А	Скорость сварки, м/ч	Диаметр электродной проволоки, мм	Число слоев	Расход газа, л/мин
Без разделки	2 3 4	80—110 120—150 160—190	30 32—36 28—30	0,5—0,75 1,2—1,6 1,6	1	8—15
С V-образной разделкой	6 8 20	140—190 250—280 240—300	26—28 36 18—20	1,6 1,6—2.0 2,0	1 2 2—4	11—15 15—18 15—18

Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом расширяет возможность сварки алюминиевых сплавов при различных пространственных положениях. При этом улучшается формирование швов, регулируется время пребывания металла сварочной ванны в расплавленном состоянии, а значит и протекание металлургических реакций. Ориентировочные режимы импульсно-дуговой автоматической сварки плавящимся электродом приведены в табл. 17.

При **плазменной сварке** (сжатой дуге) концентрация энергии в пятне нагрева высокая, что делает этот вид сварки перспективным для соединения алюминиевых сплавов. Преимуществом плазменной сварки является высокая скорость, значительное сокращение зоны термического влияния, стабильность процесса, благодаря чему не требуется контроль и поддержание постоянства длины дуги, что облегчает выполнение ручной сварки. При плазменной сварке, в связи с глубоким проплавлением, резко увеличивается доля основного металла в формировании шва. Однако при этом необходимо соблюдать точность сборки деталей под сварку и ведения горелки по стыку. Для алюминиевых сплавов необходимо применять плазменную сварку с питанием дуги переменным током. Ориентировочные режимы плазменной сварки приведены в табл. 18.

17. Ориентировочные режимы импульсной автоматической аргонодуговой сварки плавящимся электродом алюминиевых сплавов (соединения встык)

Расположение швов в пространстве	Толщина металла, мм	Диаметр электродной проволоки, мм	Ток, А: дежурной дуги	Ток, А: сварочных импульсов	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Расход газа, л/мин
Нижнее	2.5	1,6	25—30	60—90	18—20	35—50	8—9
	4		30—40 45—50	120—150	20—21	35	8—10
	6	2	50—55	180—210	21—22		10—12
	8			200—250	22—23	25—30	12—15
Вертикальное	2,5 4	1,6	30—40	70—80 120—150	17—18 20—21	15—50 25—30	8—9 8—10
	6 8	2	50—55	150—180 180—250	21—22	20—30 20—30	10—12
	10 14—25			200—250 240—310	22—23 23—24	20—25 10—20	12—14 14—16

Примечание. Частота импульсов 50 имп/с (сварку на токах более 200 А целесообразно выполнять с частотой 100 имп/с).

При плазменной сварке на постоянном токе обратной полярности применяют горелки с усиленным принудительным охлаждением вольфрамового электрода.

С помощью слаботочной сжатой дуги (микроплазмы) можно сваривать алюминиевые сплавы толщиной 0,2—1,5 мм при силе тока 10—100 А. При микроплазменной сварке применяют аргон чистотой не менее 99,98%; в качестве защитного газа используют гелий чистотой 99,95%. Гелий, защищая сварочную ванну от атмосферы, затрудняет развитие фронта ионизации в радиальном направлении, и дополнительно сжимая дугу, делает ее пространственно устойчивой. Сварочные горелки рассчитаны на применение лантанированных вольфрамовых электродов диаметром 0,8—1,5 мм.

18. Ориентировочные режимы плазменной сварки алюминиевого сплава АМг6 встык за один проход

Толщина металла, мм	Сварочный ток, А	Напряжение на дуге, В	Скорость сварки, м/ч	Расход газа, л/мин: плазмообразующего	Расход газа, л/мин: защитного
4	210 250	24—26	45 70	3 5	— —
6	320	24—28	50	2	5
8	360		30		
10	400	28—30	25	3	6
14	450		16	4	10

Контактную сварку (точечную и шовную) применяют для соединения листов и профильного проката преимущественно из деформируемых алюминиевых сплавов (АМц, Д16, АМг6 и т. д.). Рельефная сварка, как правило, не дает положительных результатов из-за быстрого смятия выступа, нагретого током, под действием свароч-

ного усилия. При точечной сварке на поверхность детали из материалов типа САП предварительно наносят слой плакированной смеси из алюминия или его сплавов толщиной 3—5% толщины листа. Сварку рассматриваемых сплавов производят при больших плотностях тока (до 2000 А/мм²) на мощных машинах постоянного тока, низкочастотных машинах или машинах с запасенной энергией в электрическом поле (на конденсаторных машинах). Ввиду большой теплопроводности и относительно малой прочности алюминиевых сплавов рекомендуется нагревать металл на относительно жестких режимах кратковременными импульсами тока, длительность $t_{св}$ которых не превышает 0,3—0,4 с. Величина $t_{св}$ зависит от толщины деталей и свойств металла, и в первую очередь от сопротивления его пластической деформации. Для сравнительно пластичных металлов при температурах сварки (АМц, Д16) толщиной S до 3 мм можно использовать конденсаторные машины ($t_{св} = 0{,}02 \div 0{,}05$ с). Сплавы с повышенным содержанием магния (АМг6) целесообразно сваривать на машинах постоянного тока или на низкочастотных машинах [$t_{св} = (0{,}08 \div 0{,}1)\ S$] током с более длительными импульсами.

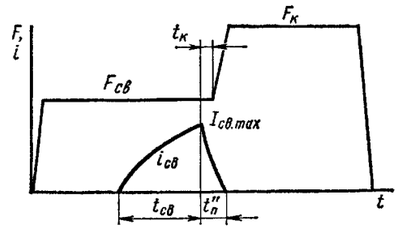


Рис. 6. Циклограмма процесса контактной точечной сварки

Сварочное усилие $F_{св}$ возрастает при увеличении S и снижении $t_{св}$. При сварке сплава АМг6 на конденсаторных машинах $F_{св} = (800 \div 1000)\ S$. При шовной сварке значения $t_{св}$ и $F_{св}$ меньше, чем при точечной, из-за повышенного теплосодержания металла шва. При этом в основном рекомендуются машины постоянного тока с шаговым перемещением роликов.

Большинство свариваемых алюминиевых сплавов отличается широким интервалом кристаллизации и значительной усадкой. Поэтому для предупреждения образования трещин и раковин в литом металле ядра используется ковочное усилие $F_к$, время $t_к$ приложения которого по отношению к моменту выключения тока составляет 0,02—0,08 с в зависимости от толщины деталей [$t_к = (0{,}01 \div 0{,}015)\ S$]. Вероятность образования трещин определяется объемом расплавленного металла, и поэтому проковку рекомендуется производить при сварке деталей толщиной более 1,5—2 мм. Для ориентировочной оценки принимают, что $F_к = (1{,}5 \div 2)\ F_{св}$. Для облегчения условий проковки и снижения $F_к$ можно использовать дополнительный импульс тока, следующий через некоторую паузу $t''_п$ после сварочного (рис. 6). Снижение сопротивления деформации и склонности к образованию выплесков достигается при применении предварительного импульса тока, по силе и длительности меньше сварочного. Для этой цели рекомендуется плавное или ступенчатое повышение сварочного усилия по мере нагрева и плавления металла [9].

Электроды и ролики для точечной и шовной сварки алюминиевых сплавов изготовляют из металлов с высокой тепло- и электропроводностью, например из кадмиевой бронзы БрКд1. Электроды и ролики зачищают для удаления продуктов взаимодействия и восстановления исходного профиля рабочей поверхности через 100 точек. Наибольшее распространение при этом получили электроды и ролики со сферической рабочей поверхностью, радиус которой зависит от толщины свариваемого металла (табл. 19).

Контактную стыковую сварку различных деталей из алюминиевых сплавов производят преимущественно методом оплавления. Режимы сварки отличаются большими скоростями оплавления (до 20 мм/с к концу процесса), особенно при соединении термически упрочняемых сплавов с широким интервалом кристаллизации, значительными усилиями и скоростями осадки (более 150 мм/с). Оплавление производится на высоких плотностях тока (40—60 А/мм²) перед осадкой. Давление осадки при обычной схеме деформации составляет 15—30 кгс/мм² [1]. Осадку целесообразно производить с принудительным формированием стыка, что позволяет устранить расслоения и рыхлоты, которые часто образуются при свободной осадке. При сварке деталей больших сечений применяют предварительный подогрев сопротивлением при увеличенной установочной длине и плотности тока 5—7 А/мм². Подогрев в течение 30—40 с сплавов АМц и Д16 до 150—200° С и сплава АМг6 до 300° С не приводит к разупрочнению металлов.

19. Ориентировочные режимы точечной сварки сплава АМг6 на машинах постоянного тока

Толщина деталей S, мм	Время сварки $t_{св}$, с	Сварочное усилие $F_{св}$, кгс	Сила тока $I_{св}$, кА	Ковочное усилие $F_к$, кгс	Время $t_к$, с	Радиус сферы электродов, мм
1 + 1	0,1	600	30	—	—	50
2 + 2	0,2	1300	45	2500	0,02	100
3 + 3	0,3	2000	55	4000	0,04	150
4 + 4	0,4	3000	60	6000	0,06	150

Свойства сварных соединений

Механические свойства сварных соединений алюминиевых сплавов зависят от технологии их получения, а также состояния материала до сварки и обработки после сварки. Предел прочности и угол загиба сварных соединений из некоторых алюминиевых сплавов при 20° С приведены в табл. 20 и 21.

20. Механические свойства сварных соединений встык из алюминиевых сплавов

Марка сплава	Толщина металла, мм	Металл образцов		Предел прочности, кгс/мм²	Угол загиба, градусы
		до сварки	после сварки		
АД1АМ	1,5	Отожженный	Исходный	8,5	180
АМцАМ		»		11,7—12,3	—
АМг1АМ	2	»		8,5—9,1	—
АМг1АМ		Нагартованный		8,8—10,0	—
АМг2АМ		Отожженный		19,5—19,6	—
АМг2АМ		Нагартованный		19,5—19,6	—
АМг3АМ		Отожженный		22,0—23,0	—
АМ5ВАМ		»		30,5	—
АМг6АМ		»		37,5	85—96
АМг6П		Полунагартованный		36,6	—
АМг6АН		Нагартованный		36,6	71—84
Д20АТ1		Закаленный и искусственно состаренный		27,5—28,0	67—92
Д20АТ1		То же	Искусственно состаренный	28,0—30,0	43—57
Д20АТ1		»	Закаленный и искусственно состаренный	44,0—46,4	80—85
Д20АТ		Закаленный	Искусственно состаренный	28,5—29,0	51—62
Д20АТ		»	Закаленный и искусственно состаренный	41,5—42	47—60

Продолжение табл. 20.

Марка сплава	Толщина металла, мм	Металл образцов		Предел прочности, кгс/мм²	Угол загиба, градусы
		до сварки	после сварки		
Д20АМ	1,5	Отожженный	Отожженный	16,7—20,0	180
Д16АТ		Закаленный и естественно состаренный	Исходный	22,9—32,5	—
Д16АМ		Отожженный	»	20,5—20,7	—
М40АМ	5,0	»	»	29—30	20—40
М40АТ		Закаленный и искусственно состаренный	»	29—32	24—45
В92АТ	2	Закаленный и естественно состаренный	Естественно состаренный	36,5—39,0	87—114

Примечания: 1. Соединения из алюминия и сплава АМцА получены ручной сваркой, все остальные — автоматической вольфрамовым электродом в аргоне.
2. Сплав Д16 сваривали с использованием присадочной проволоки АК, сплав АМг2А — с использованием проволоки АМг3, все остальные сплавы — с использованием проволоки, состав которой аналогичен составу основного металла.

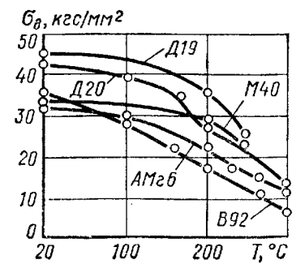
21. Механические свойства стыковых сварных соединений из алюминиевых сплавов, сваренных автоматической дуговой сваркой плавящимся электродом в аргоне (состояние образцов после сварки — исходное)

Марка сплава	Толщина металла, мм	Марка электродной проволоки	Металл образцов до сварки	Предел прочности, кгс/мм²	Угол загиба, градусы
АМг6АМ	10	АМг6	Отожженный	26—30	35—50
	15			26—33	28—40
М40АТ	10	М40	Закаленный и естественно состаренный	24—25	10—15
	10	АМг6		18—21	8—15
Д20АТ1	8	Д20	Закаленный и искусственно состаренный	35—39	25—36
	15			35—36	13—34
АВАТ	20	АВ	Отожженный	9—13	13—16
	20	АК		10—12	29—82

Предел прочности сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов изменяется с повышением температуры (рис. 7).

Прочность сварных соединений, выполненных контактной точечной сваркой, оценивается по результатам испытаний образцов на срез и отрыв. Например, средние разрушающие нагрузки при испытании образцов из сплава Д16 составляют 690 кгс (срез) и 240 кгс (отрыв) на точку [1]. Предел прочности образцов, сваренных шовной сваркой, зависит от толщины металла и, например, для сплава АМг6 составляет в среднем 80% предела прочности на растяжение основного металла. При действии знакопеременных нагрузок прочность соединений относительно невелика. Например, напряжения в листе при усталостном разрушении точечного соединения из сплава АМг6 составляют 2,2 кгс/мм². Использование клеесварных конструкций позволяет в 2—3 раза повысить предел выносливости. Свойства соединений (прочность и пластичность), выполненных стыковой сваркой оплавлением, мало уступают свойствам основного металла.

Рис. 7. Прочность сварных соединений из алюминиевых сплавов при повышенных температурах (соединения встык, толщина 2 мм)



СВАРКА МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Основные свойства и особенности сварки

Чистый магний обладает относительно невысокой прочностью и малой пластичностью. В качестве конструкционных материалов используют сплавы магния, имеющие высокую удельную прочность при сохранении малой массы. Магниевые сплавы отличаются повышенной чувствительностью к коррозии во многих средах. Это объясняется тем, что образующаяся поверхностная окисная пленка неплотная и не обладает высокими защитными свойствами, как например, окисная пленка на алюминии. Для защиты от коррозии на поверхности деталей из магниевых сплавов наносят специальные защитные пленки или лакокрасочные покрытия. С целью уплотнения окисных пленок в состав магниевых сплавов часто вводят добавки бериллия.

Магниевые сплавы, так же как и алюминиевые, разделяют на деформируемые и литейные сплавы. По чувствительности к термообработке различают магниевые сплавы термически упрочняемые и не упрочняемые термической обработкой. По системе легирования деформируемые сплавы могут быть разделены на несколько групп [6].

Группа I. Сплавы системы Mg—Mn: МА1, МА8. Эти сплавы не упрочняются термической обработкой и относительно хорошо свариваются.

Группа II. Сплавы системы Mg—Al—Zn: МА2, МА2-1, МА2-1 п. ч., МА5. Эти сплавы не упрочняются термической обработкой, удовлетворительно свариваются.

Группа III. Сплавы системы Mg—Zn—Zr: МА-14 (ВМ65-1), ВМД-3. Эти сплавы упрочняются термической обработкой, отличаются повышенной жаропрочностью и невысокой свариваемостью.

Кроме того, применяются сплавы и других систем легирования: жаропрочные сплавы системы Mg—Th—Mn (МА13), высокопрочные сплавы системы Mg—Al—Cd—Ag (МА10) и др. К литейным сплавам относятся сплавы системы Mg—Mn (Мл2), системы Mg—Al—Zn (Мл3, Мл4, Мл5, Мл6), системы Mg—Nd—Zr (Мл10) и др. Из общего перечня деформируемых сплавов различного назначения для изготовления сварных конструкций наиболее широко используют сплавы: МА1, МА2, МА2-1, МА2-1 п. ч., МА8, МА13, МА11.

Магний является одним из металлов с высоким сродством к кислороду. Поэтому сплавы на основе магния в условиях сварки активно окисляются кислородом окружающей среды. В связи с высокой температурой плавления окисная пленка на поверхности кромок свариваемых деталей затрудняет образование общей сварочной ванны и должна быть разрушена или удалена в процессе сварки. Особенностью окисной пленки являются ее плохие защитные свойства и способность удерживать большое количество влаги.

Кроме кислорода, в атмосфере, окружающей ванну, могут присутствовать CO, CO_2, пары воды, азот и водород. Магний взаимодействует с этими газами, образуя карбиды, нитриды и окислы. В отличие от других газов водород обладает

способностью растворяться в магнии. При кристаллизации растворимость резко сокращается. Однако критическая концентрация водорода в атмосфере защитного газа, способная вызвать пористость при сварке магниевых сплавов, велика и для реальных условий практически маловероятна [4]. Это объясняется большой растворимостью водорода в металле. Основной причиной появления пор при сварке магниевых сплавов является выделение водорода, образующегося при разложении остатков влаги, содержащейся в частицах окисной пленки. При этом водород выделяется в молекулярной форме, минуя стадию растворения. Для борьбы с пористостью в швах рекомендуются меры, направленные на сокращение концентрации окисных частиц, замешиваемых в ванну, а также применение рациональной обработки поверхности присадочного металла и кромок свариваемых деталей.

При кристаллизации магниевые сплавы склонны к образованию крупнокристаллической структуры. Многие легирующие элементы при высоких скоростях охлаждения способны образовывать с магнием неравновесные эвтектики. Эти факторы способствуют возникновению кристаллизационных трещин. На склонность к образованию трещин влияет интервал кристаллизации сплава, температурный интервал хрупкости (ТИХ), а также пластичность металла шва в ТИХ. Повышение сопротивляемости сплавов образованию кристаллизационных трещин достигается введением в их состав модификаторов и применением при сварке присадочного металла, имеющего химический состав с меньшей склонностью к образованию трещин. Одной из характерных особенностей большинства магниевых сплавов являются также склонность их к росту зерна при нагреве. При сварке сплавов, упрочняемых термической обработкой, наряду с ростом зерна в околошовных зонах возможны распад твердого раствора и оплавление границ зерен. Эти процессы приводят к разупрочнению металла околошовной зоны, а иногда к возникновению трещин.

22. Склонность магниевых сплавов к образованию трещин при аргонодуговой сварке с присадкой

Сплав	Присадочный металл	$k_{тр}$, %
МА2	МА2	14
МА2	МА2-1	8
МА2-1	МА2-1	10
МА8	МА8	31
МА8	МА2-1	10

Магний обладает высоким коэффициентом линейного расширения ($\alpha = 29 \cdot 10^{-6}$ 1/°С). В связи с этим сварка сплавов на его основе осложняется большой склонностью свариваемых конструкций к короблению, а иногда к образованию трещин. Склонность к образованию трещин при сварке различных магниевых сплавов приведена в табл. 22. Для предупреждения трещин и уменьшения коробления рекомендуется сварка с подогревом конструкций или последующая термическая обработка их для снятия напряжений.

Технология сварки

Подготовка деталей под сварку. Подготовка деталей заключается в удалении поверхностных загрязнений, окисных и защитных пленок, а также профилировании свариваемых кромок. Поверхностные загрязнения удаляют с помощью растворителей или специальных составов, а окисные и защитные пленки — механическим или химическим способами. Применяют следующую технологию подготовки поверхности деталей из магниевых сплавов: 1) обезжиривание в ванне: 20—30 г/л $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$, 30—50 г/л $NaCO_3$; 20—50 г/л NaOH; 3—5 г/л жидкого стекла; 2) промывка в проточной горячей воде при 50—60° С в течение 0,5—1 мин; 3) удаление защитного покрытия в щелочной ванне: 200—300 г/л NaOH при 70—80° С в течение 10—15 мин; 4) промывка в проточной горячей воде при 50—60° С в течение 0,1—1 мин; 5) промывка в холодной воде; 6) химические травления в ванне: 150—200 г/л CrO_3; 25—35 г/л NaO_3, 2—3 г/л CaF_2, время травления 2 мин при 20° С; 7) промывка в холодной проточной воде; 8) сушка сжатым воздухом при 60—90° С.

Поверхность присадочного металла обрабатывается по приведенной технологии или с применением для травления раствора 180 г/л CrO_3 при 90° С; время травления 5 мин. Перед сваркой кромки деталей рекомендуется зачищать шабером.

Перед точечной и шовной сваркой поверхности деталей после механической обработки дополнительно зачищают вращающимися металлическими щетками. Срок хранения деталей до сварки 24 ч. При этом электрическое сопротивление свариваемых поверхностей деталей не должно превышать 120 мкОм.

Типы соединений и технология сварки. В конструкциях из магниевых сплавов применяют все основные типы сварных соединений, принятые при сварке алюминиевых сплавов. Исключение составляют соединения с отбортовкой кромок. В связи с недостаточной пластичностью магниевых сплавов отбортовка кромок даже для металла малой толщины не применяется. Встык без разделки кромок рекомендуется сваривать соединения за один проход при односторонней сварке на подкладках, имеющих специальные профилированные канавки, аналогичные применяемым при сварке алюминиевых сплавов. Двусторонняя сварка стыковых соединений без разделки кромок не рекомендуется из-за опасности появления в швах большого количества окисных включений. При сварке соединений из металла толщиной более 6—10 мм применяется V-образная или чашеобразная разделка кромок и для металла толщиной более 20 мм при наличии двустороннего подхода — Х-образная разделка кромок. В последнем случае перед выполнением шва с обратной стороны необходима предварительная разделка корневой части первого шва.

Для контактной точечной и шовной сварки магниевых сплавов характерны нахлесточные соединения, размеры которых определяются ГОСТ 15878—70. Низкая температура воспламенения магния исключает применение стыковой сварки оплавлением.

Сварку магниевых сплавов можно выполнять лишь при условии надежной защиты сварочной ванны и близлежащих участков основного металла к окружающей атмосфере. Для конструкций из магниевых сплавов применяют дуговую сварку в среде защитного газа — аргона чистотой 99,9. В промышленности широко используют дуговую сварку в среде защитного газа неплавящимся вольфрамовым электродом, а также трехфазной дугой. Ручной и автоматической сваркой вольфрамовым электродом встык без разделки кромок за один проход могут быть сварены детали толщиной до 6 мм. С увеличением толщины необходимо производить разделку и заполнять место разделки в несколько проходов. Диаметры присадочной и сварочной проволоки для сварки деталей из магниевых сплавов разных толщин приведены в табл. 23.

23. Диаметры присадочной и сварочной проволоки для разных толщин магниевых сплавов

Толщина металла, мм	Сварка вольфрамовым электродом	Сварка плавящимся электродом	
	Диаметр присадочной проволоки, мм	Диаметр сварочной проволоки, мм	Скорость подачи проволоки, мм/с
До 2.0	1,5—2	0,8	37—41
2—3	2—2,5	1,2	20—22
4—6	2.5	1,6	13—15
8	3.0	2.0	10—12
Св. 10	3,4	2,5—3,2	8—9

Для металла толщиной более 5 мм может быть использована автоматическая сварка плавящимся электродом со струйным переносом электродного металла. Для более тонкого металла применяют сварку короткой дугой с периодическими кратковременными замыканиями дугового промежутка. В обоих случаях процесс

сварки ведется на постоянном токе обратной полярности. Сварка плавящимся электродом особенно эффективна для соединения металла большой толщины. В этом случае увеличивается производительность процесса и благодаря лучшему перемешиванию ванны уменьшается вероятность появления в металле швов окисных включений. При сварке встык без разделки за один проход плавящимся электродом могут быть сварены листы толщиной 5—10 мм. Для толстолистовых соединений (8—10 мм и более) целесообразно использовать трехфазную сварку. Конструкции из магниевых сплавов сваривают с использованием сварочного оборудования, применяемого при сварке алюминиевых сплавов. Ориентировочные режимы [3] ручной и автоматической сварки деталей из магниевых сплавов приведены в табл. 24—26.

24. Ориентировочные режимы ручной аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом деталей из магниевых сплавов (ток переменный)

Толщина металла, мм	Тип соединения	Ток, А	Диаметр присадочной проволоки, мм	Расход аргона, л/мин	Число проходов
2,0	Встык без разделки	100—105	2,5	12—14	1
3,0		180—190			
5,0		230—240	3—4		
6,0	Встык с разделкой	200—240	4	16—18	3
8,0					
10,0		200			4—5

Дефекты отливок (поверхностные), образованные при механической обработке (поверхностные раковины, трещины и др.), заваривают в среде инертных защитных газов. Устранение дефектов подваркой достигается при разделке отливки до полного удаления дефектного металла. Подготовленные к подварке отливки нагревают до 250—300° С; тонкостенные и напряженные отливки нагревают до 340—350° С. После подварки осуществляют повторную термическую обработку. При подварке употребляют присадку состава, одинакового с составом основного металла.

Контактную точечную и шовную сварку используют для соединения деталей из магниевых сплавов толщиной до 8—10 мм. Как и при сварке алюминиевых сплавов, в этом случае требуются токи повышенной плотности. Однако вследствие относительно малого сопротивления пластической деформации сплавов магния при 350—400° С длительность импульса и сварочное усилие значительно меньше (например, $t_{св} \sim 0{,}06\ S$). При сварке деталей больших толщин (св. 2 мм) рекомендуется использовать ковочное усилие. Для точечной сварки магниевых сплавов применяют машины постоянного тока, а также низкочастотные и конденсаторные. Рыхлое строение поверхностных пленок, содержащих большое количество влаги, вызывает интенсивное взаимодействие металлов в контакте электрод—деталь. Рабочая поверхность электродов быстро покрывается продуктами взаимодействия, что вызывает монотонный рост высоты ядра до полного проплавления деталей, сопровождающегося образованием выплесков и трещин. Поэтому зачистку рабочей поверхности электродов и роликов производят при сварке магниевых сплавов после 10—20 точек или после первого оборота ролика.

25. Ориентировочные режимы автоматической сварки вольфрамовым электродом деталей из магниевых сплавов (в числителе — данные для сплава МА1, в знаменателе — для сплава МА8) на переменном токе

Толщина металла, мм	Сварка встык с присадкой				Сварка встык без присадки			
	Ток, А	Диаметр электрода, мм	Скорость, м/ч		Ток, А	Диаметр электрода, мм	Скорость сварки, м/ч	Расход аргона, л/мин
			сварки	подачи присадочной проволоки				
0,8	80—95 / 60—70	2	50—60 / 50—70	50—70 / 60—70	70—90 / 60—70	2	70—85 / 70—85	6—7
1,0	85—105 / 70—100	3	45—55 / 50—60	40—50 / 50—70	80—100 / 70—75	2	50—70 / 60—80	7—8
1,5	100—150 / 90—100	3	30—45 / 30—50	30—50 / 30—50	90—140 / 80—120	3	30—50 / 30—60	8—9
2,0	140—200 / 130—180	4	20—40 / 25—50	30—40 / 25—40	140—180 / 120—160	4	20—50 / 30—50	9—10
2,5	200—240 / 170—220	5	15—30 / 20—30	30—40 / 20—30	170—210 / 140—210	4	20—40 / 20—40	9—10
3,0	230—260 / 200—250	5	15—25 / 15—30	25—40 / 20—30	200—240 / 180—230	5	15—20 / 20—30	9—11

26. Ориентировочные режимы аргонодуговой сварки плавящимся электродом деталей из магниевых сплавов

Толщина металла, мм	Число слоев	Диаметр проволоки, мм	Ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость, м/ч		Расход аргона, л/мин
					подачи проволоки	сварки	
5	1	2,0	140—150	20—23	260 230	25—27 26—27	20—22
10		2,5	290—300 290—310	21—24	400 450	24—26 27—28	
15 20	2		270—290 280—300		360 430	26—27 25	
30	4		270—280		420	20	21—24

Свойства сварных соединений

Деформируемые магниевые сплавы чувствительны к перегреву. Прочность сварного соединения по длине шва может изменяться в широких пределах в зависимости от скорости сварки. Прочность снижается в местах повторного нагрева (подварки), переплавленных прихваточных швов и высоких проплавлений. Проч-

ность соединений различных магниевых сплавов составляет 75—100% прочности основного металла. Механические свойства сварных соединений [2] приведены в табл. 27 и 28.

Механические свойства соединений, выполненных контактной точечной сваркой, приведены в табл. 29.

27. Механические свойства стыковых соединений деформируемых магниевых сплавов при 20° С (ручная сварка, присадочный металл основного состава)

Сплав	Толщина металла, мм	$\sigma_{в св}$, кгс/мм²		Угол загиба, градусы	$\frac{\sigma_{в\ св}}{\sigma_{в,\ осн}}$, %
		с усилением	без усиления		
МА1	1—3	13,6—14,7	13,1—15,0	51—65	75
МА2-1	2—3 4—8	2.67—27,9 25,2—27,6	25,7—27,2 25,6—27,2	70—100 46—70	98 96
МА8 МА11 * МА13 * ВМ65-1	2—3 2—3 2—3 2	16,8—18,7 19,2—20,5 17,6—18,4 15,1—16,6	13,6—16,6 16,8—29,0 — —	39—53 37—50 — 41—54	80 78 80 49

* Без термической обработки после сварки.

28. Прочность сварных соединений из сплава МА2-1, полученных при автоматической аргонодуговой сварке вольфрамовым и плавящимся электродами

Толщина металла, мм	Прочность основного металла, кгс/мм²	Прочность сварных образцов, кгс/мм²				Угол загиба, градусы	
		с усилением		без усиления			
		Плавящийся электрод	Вольфрамовый электрод	Плавящийся электрод	Вольфрамовый электрод	Плавящийся электрод	Вольфрамовый электрод
5 10	27,0 26,5	25,2—26,6 25,1—26,1	25,2—27,6 23,4—24,4	25,1—25,7 —	25,5—26,5 —	58—75 40—42	48—66 38—40
15 30	26,0	— —	— —	25,1—25,5 25,4—25,7	22,8—24,0 21,9—23,8	— —	— —

29. Прочность при статических нагрузках соединений из сплава МА2-1[1]

Толщина листов, мм	Разрушающая нагрузка, кгс		Толщина листов, мм	Разрушающая нагрузка, кгс	
	на срез	на отрыв		на срез	на отрыв
0,8+0,8 1,0+1,0 2,0+2,0	115 160 415	25 40 200	3,0+3,0 4,0+4,0	770 1300	355 —

Предел прочности образцов, сваренных непрерывным швом при роликовой сварке, составляет около 60% предела прочности основного материала. Однако в реальных конструкциях прочность сварных швов значительно выше [9].

Список литературы

1. **Зайчик Л. В., Орлов Б. Д., Чулошников П. Л.** Контактная электросварка легких сплавов. М., Машгиз, 1963. 215 с.
2. **Макаров В. И., Скачков Ю. Н.** Сварка магниевых сплавов. М., «Машиностроение», 1972. 120 с.
3. **Никифоров Г. Д.** Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов. М., «Машиностроение», 1972. 259 с.
4. **Никифоров Г. Д., Антонов Е. Г.** Основные источники водорода, растворяющегося в сварочной ванне при аргонодуговой сварке магниевых сплавов. — «Сварочное производство», 1969, № 3, с. 1
5. **Патон Б. Е., Потапьевский А. Г., Подола А. В.** Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом с программным регулированием. — «Автоматическая сварка», 1967, № 1, с.
6. **Портной К. И., Лебедев А. А.** Магниевые сплавы. М., Металлургиздат, 1952. 250 с.
7. **Промышленные** деформируемые, спеченные и литейные алюминиевые сплавы. Под ред. Ф. И. Квасова, И. Н. Фридляндера. М., «Металлургия», 1972. 552 с.
8. **Справочник** по сварке. Под ред. Е. В. Соколова. Т. 2. М., Машгиз, 1961. 664 с.
9. **Технология** и оборудование контактной сварки. М., «Машиностроение», 1975. 534 с. Авт.: Б. Д. Орлов и др.

Глава 11

СВАРКА МЕДИ, СВИНЦА, БЕРИЛЛИЯ, СЕРЕБРА И ИХ СПЛАВОВ

СВАРКА БЕРИЛЛИЯ

Бериллий — легкий металл II группы периодической системы элементов Д. И. Менделеева; порядковый номер 4; относительная атомная масса 9,01; принадлежит к числу редких элементов. Бериллий — металл серебристо-серого цвета, хрупкий и не ковкий на холоде; плотность 1,82 г/см^3 при 20° С; температура плавления 1285° С; температура кипения 2970° С; удельная теплоемкость 0,508 кал/г (г·°С) в интервале температур 0—100° С. Коэффициент теплопроводности 0,392 кал/(см·с·г·° С) (при 20° С). Твердость *НВ* 98 (диаметр шарика 2,5 мм; нагрузка 187 кгс); модуль упругости 30 000 кгс/мм^2; удельное электрическое сопротивление при 0° С $5{,}88 \cdot 10^{-6}$ Ом·см.

Изделия из бериллия получают прессованием его порошка с последующим спеканием полученных заготовок в вакууме при 450—500° С, либо плавкой и литьем в глубоком вакууме или в атмосфере инертного газа. В литом состоянии бериллий особенно хрупок. Величина и ориентирование зерна влияют на механические свойства этого металла. Горячепрессованные брикеты являются исходным материалом для прокатки и других видов обработки. При 20° С компактный бериллий устойчив по отношению к кислороду и воде, так как тонкая пленка окиси, покрывающая металл, защищает его от окисления. При высоких температурах бериллий обладает высокой химической активностью по отношению к кислороду, азоту, водороду, галогенам и т. д. Бериллий в тонкоизмельченном виде и его окись BeO обладают высокой токсичностью. Бериллий применяют для нанесения твердого диффузионного слоя на поверхность стали, в результате чего она приобретает высокую поверхностную твердость, хорошее сопротивление коррозии в разных средах, а также высокую жаростойкость, т. е. сопротивляемость газовой коррозии при высоких температурах.

Наибольшее распространение в промышленности получили следующие способы сварки бериллия: дуговая вольфрамовым электродом в камере с контролируемой атмосферой, электронно-лучевая, диффузионная, контактная.

Дуговая сварка вольфрамовым электродом в камере с контролируемой атмосферой возможна как ручная, так и автоматическая. Перед началом сварочных работ в камере создается разряжение $1 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.; затем в камеру подают инертный газ (аргон или смесь аргона с 50% гелия), предварительно высушенный и дополнительно очищенный от кислорода и азота, до создания избыточного давления (0,2 кгс/см^2). Для очистки мест сварки от окисной пленки деталь перед сваркой протравливают при 20° С в ванне с 40% HNO_3, 2% HF и 58% H_2O. Время травления детали устанавливают опытным путем, оно зависит от ее размеров и конфигурации. После травления деталь промывают в воде и сушат.

Вследствие того, что бериллий в расплавленном состоянии может вступить во взаимодействие с многими металлами с образованием химических соединений и твердых растворов, что вызывает растрескивание и пористость шва, детали сборочно-сварочных приспособлений, находящиеся в непосредственном контакте со швом (например, подкладки), рекомендуется изготовлять из коррозионностойкой стали аустенитного класса с покрытием из окиси алюминия толщиной 0,1 мм.

При сварке бериллия чаще используют переменный ток, преимущество которого перед постоянным — катодное распыление, которое разрушает пленку окислов, образующуюся в процессе сварки на поверхности ванны. При дуговой сварке вольфрамовым электродом в контролируемой атмосфере на формирование и качество шва влияет подбор сварочного тока. С ростом сварочного тока в результате значительного перегрева расплавленного металла увеличиваются размеры зерен при кристаллизации шва, что является одной из причин появления горячих трещин. Оптимальный сварочный ток, обеспечивающий удовлетворительное формирование и качество шва при ручной сварке листов толщиной 1,27—6,35 мм, приведен на рис. 1. Повышение тока на 25% по сравнению с оптимальным приводит к увеличению размеров зерен на 50%.

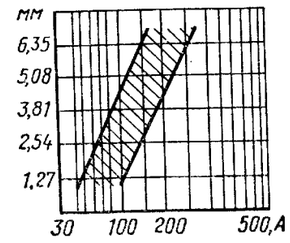


Рис. 1. Рекомендуемый сварочный ток для ручной дуговой сварки бериллия вольфрамовым электродом в контролируемой атмосфере (смесь аргона и 50% гелия)

При дуговой сварке вольфрамовым электродом в контролируемой атмосфере основными дефектами соединения являются продольные и поперечные трещины, возникающие в момент кристаллизации, что указывает на их образование при высокой температуре. В месте образования трещин обнаруживается структурная составляющая, появление которой связывают с присутствием в бериллии алюминия, образующего с ним легкоплавкую эвтектику (температура образования эвтектики 644° С). При содержании примеси алюминия меньше 0,06% продольные трещины в швах отсутствуют. Для предотвращения образования горячих трещин в швах рекомендуется подогрев изделия перед сваркой, причем повышение сварочного тока и скорости сварки должно сопровождаться увеличением температуры предварительного подогрева. Например в шве, выполненном на бериллии толщиной 3 мм током 150 А при скорости сварки 10 м/ч, необходим подогрев до 200° С, а при токах 225—400 А и скорости сварки 16,8—23 м/ч — подогрев до 600° С. При последующей термической обработке в вакууме при 825° С с выдержкой 30 мин заметно увеличивается прочность на растяжение и относительное удлинение сварного соединения.

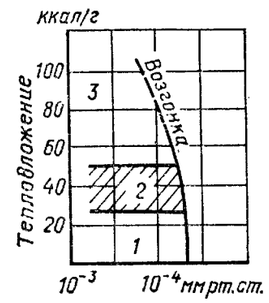


Рис. 2. Влияние тепловложения и давления в камере на способность возгонки бериллия и диапазон режимов сварки:

1 — обеспечивающих получение сварных соединений без дефектов; *2* — приводящих к образованию горячих трещин в швах; *3* — приводящих к образованию холодных трещин в сварных соединениях

Электронно-лучевую сварку выполняют в герметичных камерах, в которых поддерживается глубокий вакуум (10^{-4}—10^{-6} мм рт. ст.), что обеспечивает надежную защиту свариваемого металла. При сварке бериллия в вакууме наблюдается его интенсивная возгонка. При давлении $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. теоретическая точка кипения (1170° С) бериллия значительно ниже точки его плавления (1285° С). Степень возгонки бериллия возрастает по мере увеличения вакуума. Предполагается, что при очень высокой плотности электронного луча более вероятна возгонка металла, чем его расплавление (рис. 2). Режимы сварки бериллия приведены в табл. 1.

Электронно-лучевая сварка бериллия при низком ускоряющем напряжении (9—14 кВ) приводит к значительному росту зерна. Использование для сварки

этого металла более высокого напряжения и высоких скоростей сварки может привести к получению мелкозернистой структуры металла. Величина зерна металла шва при сварке электронным лучом влияет на прочность (рис. 3).

1. Режимы электронно-лучевой сварки бериллия (давление в камере $8 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.; скорость сварки 12 м/ч)

Толщина листов, мм	Ускоряющее напряжение, кВ	Ток эмиссии, мА
0,5	9,0	20
1,6	14,0	50

Диффузионно-вакуумная сварка основана на взаимной диффузии атомов контактирующей пары металлов, находящихся в твердом состоянии. Процесс заключается в пластической деформации, рекристаллизации и сращивании зерен по поверхности раздела при высоких температурах и разряжении в камере $5 \cdot 10^{-5}$—$1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Прочность на разрыв сварного соединения бериллия, выполненного диффузионным методом, зависит от шероховатости свариваемых поверхностей, температуры сварки и прочности основного металла. При сварке отполированных поверхностей прочность соединения увеличивается с повышением температуры сварки до 900—975° С. При более высокой температуре прочность уменьшается вследствие интенсивного роста зерна в основном металле. Максимальная прочность сварного соединения близка к прочности основного металла: 28 кгс/мм² при относительном удлинении 0,3—1,0% на образцах, полученных путем горячего прессования порошка бериллия, и 42 кгс/мм при относительном удлинении 5,6% на образцах бериллия, подвергнутых после прессования горячей вытяжке.

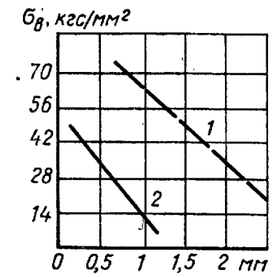


Рис. 3. Зависимость предела прочности основного металла и металла шва от диаметра зерна: *1* — основной металл; *2* — металл шва

Контактная сварка. Точечную сварку бериллия осуществляют на серийных контактных машинах, оснащенных устройством для постепенного нарастания и спада тока. Для уменьшения остаточных напряжений вокруг сварной точки, приводящих к образованию трещин, рекомендуется предварительный и последующий нагрев сварного соединения. Детали перед сваркой нагревают от внешнего источника до появления красноты. После завершения цикла сварки внешний источник отключают. Испытания растяжением на срез сварных соединений бериллия толщиной 0,4 мм показали, что при 20° С нагрузка разрушения составляет 70 кгс (хрупкий излом).

СВАРКА СВИНЦА

Температура плавления свинца 327° С, кипения 1525° С. На воздухе свинец окисляется, образуя тугоплавкую окись PbO. Свинец используют главным образом для облицовки стальной кислотоупорной аппаратуры и трубопроводов. Химический состав различных марок чушкового и рулонного свинца приведен в табл. 2.

Наличие сурьмы в свинце придает металлу шва хрупкость. Поэтому для сварки используют только бессурмянистый свинец. Пары свинца ядовиты, поэтому сварка без респиратора не допускается. Сварку свинца осуществляют преимущественно газовым пламенем и дугой, угольным или графитовым электродом.

Перед сваркой свариваемые кромки должны быть зачищены до металлического блеска на ширину не менее 30 мм от каждой кромки. Очищенная поверхность свинца сохраняется незначительное время, и может потребоваться повторная зачистка кромок перед сваркой. При двусторонней сварке металла толщиной

до 10 мм скос кромок не производят. Для полного провара металла толщиной более 6 мм при односторонней сварке рекомендуется производить односторонний скос кромок под углом 35° с каждой стороны с притуплением до 4 мм. При вертикальной сварке свинца следует применять передвижные формирующие планки-подкладки. Применять подкладки рекомендуется и при сварке других стыковых соединений, причем для толщин до 4 мм подкладки могут быть из асбеста.

2. Химический состав свинца (ГОСТ 3778—74)

Марка	Pb, %, не менее	Примеси, %, не более								
		Ag	Cu	Zn	Bi	As	Sn	Sb	Fe	Всего нормируемых
С0	99,992	$3 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$
С1	99,985	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$15 \cdot 10^{-3}$
С2	99,95	$15 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-2}$
С3	99,9	$15 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-1}$

Примечание. Сурьмянистый свинец по ГОСТ 1292—74 содержит 0,15—12% Sb в зависимости от марки. Листовой рулонный свинец поставляют по ОСТ ЦМ-414—39.

Присадочную проволоку или полоски прямоугольного сечения выбирают в соответствии с маркой свариваемого свинца. Диаметр проволоки принимают равным толщине свариваемого металла; он не должен превышать 10 мм. Длина прутков должна быть 300—350 мм. Целесообразно присадочный металл закладывать в стык, что повышает производительность сварки и до некоторой степени предохраняет от вытекания металла. Зачистка проволоки до металлического блеска перед сваркой обязательна.

При *газовой сварке* применяют ацетилено-кислородное и водородно-кислородное пламя. Как правило, газовую сварку используют при облицовке гальванических ванн, сварке свинцовых трубопроводов небольших диаметров, наплавке свинца на черные металлы. В качестве флюса применяют стеарин или расплав стеарина с канифолью, который перед сваркой наносят на зачищенные кромки листов и поверхность присадочного прутка. Перед нанесением флюса свариваемые листы в стыке подогревают горелкой. Ацетилено-кислородную сварку производят пламенем нормального состава. Мощность пламени (л/ч) $W = 100\ S$, где S — толщина свариваемого металла, мм. Процесс сварки необходимо осуществлять с максимально возможной скоростью, чтобы не допускать вытекания свинца из стыка. Для обеспечения минимального количества пор на поверхности шва применяют «левую» сварку с наклоном горелки под углом 30° к изделию.

Дуговая сварка угольным или графитовым электродом. При возбуждении дуги на свинце образуется жидкая ванна металла, которая при передвижении электрода образует шов. При бесфлюсовой сварке на поверхности расплавленной ванны образуется тонкая пленка тугоплавкого шлака (окись PbO), которую необходимо в процессе сварки непрерывно удалять механическим путем с помощью стального крючка. При небольшой толщине свариваемого металла (до 4 мм) рекомендуется применять флюс (стеарин или расплав стеарина с канифолью). При сварке используют как постоянный, так и переменный ток. Однако предпочтительней сварку вести на постоянном токе прямой полярности. В качестве источника сварочного тока могут быть использованы зарядные агрегаты или источники тока для гальванических ванн. Режимы сварки приведены в табл. 3. Скорость сварки угольным электродом составляет в среднем 1,3 м/ч для толщины свариваемого металла 10 мм.

Металл малых толщин (до 4 мм) сваривают встык за один проход, при больших толщинах — за два или три прохода. Сварку за первый проход осуществляют без присадочного металла за счет расплавления кромок. В этом случае конец

электрода перемещают по схеме, приведенной на рис. 4, *а*, при колебании электрода вдоль его оси. При втором проходе используют присадочный металл. Происходит увеличение размеров сварочной ванны, что достигается круговым движением электрода (рис. 4, *б*). Третий проход выполняют при сварке свинца значительных толщин. Для полного и лучшего провара электрод и присадочный пруток должны перемещаться так, как показано на рис. 4, *в*. Угольный электрод располагают

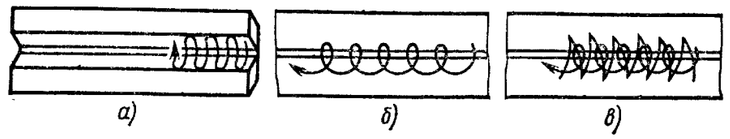


Рис. 4. Схемы движения угольного электрода при дуговой сварке свинца

перпендикулярно к свариваемому шву (стыку), а присадочный пруток — под углом 30—45° к шву; таким образом их перемещают вдоль стыка. Сварку рекомендуется вести, перемещая электрод в горизонтальной плоскости и производя им незначительные вертикальные колебания. В начале сварки путем задержки дуги подогревают первый участок стыка. Сварку ведут без перерыва. При случайном обрыве дуги необходимо вначале зачистить участок вокруг кратера до металлического блеска и лишь после этого продолжать сварку.

3. Рекомендуемые режимы дуговой сварки свинца угольным электродом

Толщина, мм	Диаметр угольного электрода, мм	Сила тока, А	Длина дуги, мм	Толщина, мм	Диаметр угольного электрода, мм	Сила тока, А	Длина дуги, мм
1—5	6—12	25—40	6—8	10—12	15—20	65—95	8—12
5—10	10—15	40—65	4—8	15—30		65—100	

Температура плавления свинца и его теплопроводность низкие, а дуга между угольным (графитовым) электродом и свинцом стабильна, что позволяет вести процесс сварки на малом токе без разбрызгивания. Поэтому здесь допустимо применять наиболее светлые сварочные стекла (ДС-100). Прочность сварного соединения равна прочности основного металла; угол загиба сварного соединения 180°. Допускается обрубка и проковка шва.

СВАРКА СЕРЕБРА И БИМЕТАЛЛА СТАЛЬ — СЕРЕБРО

Температура плавления серебра 960,5° С; коэффициент линейного расширения $19{,}7 \cdot 10^{-6}$ 1/°С; плотность 10,49 г/см³. В промышленности применяют серебро различных марок в зависимости от чистоты, а также сплавы серебра (табл. 4—5).

4. Химический состав серебра, % (ГОСТ 6836—72)

Марка	Ag не менее	Примеси, не более				
		Pb	Fe	Sb	Bi	Всего
Ср 999,9	99,99	0,003	0,004	0,001	0,002	0,01
Ср 999	99,9	0,003	0,04	0,002	0,002	0,1

5. Химический состав серебряно-медных сплавов, % (ГОСТ 6836—72) (0,005% Pb; 0,002 Sb; 0,002 Bi)

Марка	Ag	Примеси, не более	
		Fe	Всего
СрМ 970	97,0±0,3	0,08	0,18
СрМ 960	96,0±0,3		
СрМ 950	95,0±0,3	0,10	0,20
СрМ 940	94,0±0,3		
СрМ 925	92,5±0,3		
СрМ 916	91,6±0,3		
СрМ 900	90,0±0,3		0,25
СрМ 875	87,5±0,3		
СрМ 800	80,0±0,3	0,15	0,30
СрМ 770	77,0±0,5		
СрМ 750	75,0±0,5		
СрМ 500	50,0±0,5		

6. Некоторые механические свойства серебра марки Ср 999,9

Свойства	Серебро	
	не деформированное	деформированное [1]
Твердость *HB* при *t* °С:		
20	26—28	85
300	15	—
195	41	—
$\sigma_в$, кгс/мм², при *t*°С:		
20	13	28
270	11	—
195	22	30
ε, %, при *t*°С:		
20	60	4
270	34	—
195	47	—

[1] Деформация 55%.

В технике используют также серебряно-платиновые, серебряно-палладиевые и серебряно-палладиево-медные сплавы. Сварка серебра затруднена из-за большой теплопроводности, что требует применения концентрированных источников тепла и использования предварительного подогрева до 500—600° С (табл. 6).

В табл. 6 приведены некоторые механические свойства серебра.

Наиболее распространенным способом сварки серебра и его сплавов является газовая и дуговая сварка вольфрамовым электродом в аргоне. При *газовой сварке* используют метано-кислородное и ацетилено-кислородное нормальное пламя, а также присадочную проволоку, раскисленную алюминием (0,5—1,0%), и флюс, приготовленные на этиловом спирте из равных количеств буры и борной кислоты с добавкой 10% флюса, применяемого для газовой сварки алюминия. Флюс наносят перед сваркой на соединяемые кромки или присадочный пруток. Мощность пламени (л/ч) $V = (100 \div 150)\,S$, где S — толщина свариваемого металла, мм. Применяют «левый» способ сварки, при этом расстояние от ядра пламени до поверхности сварочной ванны должно быть 3—4 мм. Горелку располагают по отношению к свариваемой поверхности под прямым углом. Нагрев осуществляют с максимально возможной скоростью без перерывов и повторений. Сборку соединяемых элементов необходимо производить, как правило, без прихваток в специальных приспособлениях. Свариваемые кромки и присадочная проволока расплавляются одновременно, причем проволока нагревается до более высокой температуры. Горелка отводится от жидкого металла только после полного его затвердевания. Механические свойства сварных соединений, выполненных ацетилено-кислородной сваркой: предел прочности 10—13 кгс/мм²; угол загиба 30—180°.

Дуговая сварка вольфрамовым электродом в аргоне возможна на любом токе. Сварочные работы выполняют преимущественно на постоянном токе прямой полярности. Для обеспечения качественных швов рекомендуется применять аргон первого сорта по ГОСТ 10157—73. Присадочную проволоку выбирают по составу свариваемого металла. Возможна ручная и автоматическая сварка. Ручную сварку осуществляют справа налево «углом вперед» без поперечных колебаний; угол наклона горелки к поверхности свариваемых деталей 60—70°; присадочная проволока подается под углом 90° к вольфрамовому электроду. Выводить при-

садочный пруток из зоны защитного газа не рекомендуется во избежание насыщения его торца газами. Для ручной и автоматической сварки серебра используют серийные установки. Сопла горелок изготовляют из керамики или коррозионно-стойкой стали, так как медь образует с серебром, напыляемым на сопло при сварке, легкоплавкую эвтектику.

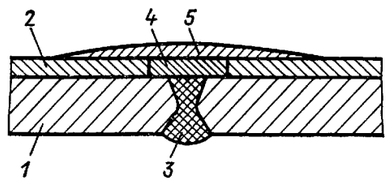


Рис. 5. Сварные стыковые соединения биметалла сталь—серебро:

1 — слой из углеродистой стали; *2* — серебряный плакирующий слой; *3* — шов из углеродистой стали; *4* — серебряная наплавка; *5* — серебряная полоса, сваренная давлением

7. Рекомендуемые режимы сварки серебра вольфрамовым электродом на постоянном токе прямой полярности

Толщина свариваемых листов, мм	Условия сварки	Диаметр вольфрамового электрода, мм	Сварочный ток, А	Диаметр присадочной проволоки, мм	Расход аргона, л/мин
1	Встык с отбортовкой кромок	2	60—70	2	3—4
2	Встык без зазора на весу		120—130	2—3	4—5
3		3	150—160	3	6—7

Примечание. Средняя скорость сварки 4—5 м/ч.

Сварку серебра производят в нижнем или слегка наклонном положении. Качественное формирование швов обеспечивается применением формирующих подкладок, особенно при автоматической сварке встык. Рекомендуемые режимы приведены в табл. 7. Сварные соединения в конструкциях из серебра обеспечивают предел прочности на растяжение 14—15 кгс/мм^2 и угол загиба 180°. В химическом машиностроении для аппаратов, работающих в агрессивных средах при повышенных температурах и давлениях, применяют биметаллические листы «низкоуглеродистая сталь — серебро». При сварке биметаллических листов выполнить шов плакирующего слоя наиболее сложно. Эта операция заключается в наплавке серебра на сталь и сварке серебра плакирующего слоя. Расплав серебра удовлетворительно смачивает сталь в водороде, в вакууме при предварительной очистке поверхности от окислов и адсорбированных газов или в присутствии флюсов, растворяющих окислы и содержащих поверхностно-активные вещества. Как правило, серебро на сталь наплавляют атомно-водородной сваркой, используя серебряную присадку.

Для обеспечения необходимой чистоты и плотности плакирующего слоя серебра после сварки производят облицовку шва серебряной лентой толщиной 0,3—1,0 мм. При этом используют сварку давлением при 700—800° С. На рис. 5 приведено сварное соединение биметалла сталь — серебро.

СВАРКА МЕДИ И МЕДНЫХ СПЛАВОВ

Медь используют в химическом и энергетическом машиностроении ввиду высокой электро- и теплопроводности, высокой коррозионной стойкости в некоторых агрессивных средах. Все эти свойства тем выше, чем выше чистота металла, что предъявляет особые требования к сварке изделий из чистой меди.

Сварка бронз и латуней имеет свои особенности, но свойства чистой меди в этих сплавах уже значительно утрачены.

Основные свойства. В промышленности используют медь различных марок в зависимости от чистоты по ГОСТ 859—66* (табл. 8).

Медь кристаллизуется в гранецентрированной кубической решетке с координационным числом $k = 12$ и стороной куба $a = 3{,}6147$ Å. Полиморфизмом медь не обладает, фазовые превращения ее связаны с изменением агрегатного состояния: температура плавления 1083° С; удельная теплота плавления 48,7 кал/г; температура кипения 2596° С; удельная теплота кипения 1140 кал/ч. В зависимости от обработки плотность меди (г/см^3): 8,93 литой; 8,94 деформированной; 8,914 электролитической. Коэффициент линейного расширения твердой меди при 20° С $\alpha = 16{,}4 \cdot 10^{-6}$ 1/° С. Теплоемкость меди 0,09 кал/(г° С) при 20° С и мало зависит от температуры. Теплопроводность меди очень высокая; при 20° С коэффициент теплопроводности $\lambda = 0{,}923$ кал/(см·с·° С) и зависит от температуры:

Температура, °С	−252.2	−200	−190	0	100	300	970
λ, кал/(см·с·°С)	29,3	1,95	1,42	0,98	0,9	0,88	0,738

Медь обладает небольшой летучестью, но при температурах сварки ее летучесть будет уже значительной, что необходимо учитывать при разработке вентиляции сварочных постов.

При 20° С удельное электрическое сопротивление меди $\rho = 1{,}682$ мкОм·см; при повышении температуры удельное электрическое сопротивление растет (при 970° С $\rho = 9{,}6$ мкОм·см); при температуре плавления удельное электрическое сопротивление жидкой меди более чем в 2 раза превышает удельное электрическое сопротивление твердой меди. Электропроводность и теплопроводность меди резко изменяются при введении примесей даже в малых количествах.

Физико-механические свойства меди зависят от степени чистоты и предварительной обработки металла (табл. 9).

Таким образом, мягкая отожженная медь представляет собой пластичный металл, в то время как медь, нагартованная после холодной пластической обработки (протяжки), значительно снижает свои пластические свойства.

Физико-химические свойства меди определяются ее положением в периодической системе Д. И. Менделеева. Окисел меди — Cu_2O устойчив при высоких температурах, а окисел CuO — при низких:

$$CuO + Cu \rightleftarrows Cu_2O.$$

Медь является пассивным металлом и не может растворяться в кислотах с выделением водорода. Реагирует с окислительными средами, например с азотной кислотой, с выделением окислов азота (NO; NO_2).

Общие сведения по свариваемости. Инертная при обычных температурах медь при нагреве реагирует с кислородом, серой, фосфором и галогенами. С водородом она образует неустойчивый гидрид CuH, с углеродом образует ацетиленистую медь Cu_2C_2 (взрывчатую); с азотом медь не реагирует, что позволяет азот использовать как защитный газ для сварки чистой меди. Образование химических соединений переменной валентности и растворимость этих соединений в жидкой меди приводит к довольно сложным диаграммам плавкости и к изменению химического сродства в зависимости от фазового состояния.

Диаграмма плавкости для системы медь—кислород приведена на рис. 6. Медь в условиях сварки может окисляться за счет газовой атмосферы или за счет обменных реакций с компонентами флюсов или электродных покрытий. Сродство меди к кислороду возрастает при растворении закиси меди в жидкой меди, особенно сильно при малых концентрациях Cu_2O, и резко снижается до нормального при распаде жидкого раствора в процессе образования эвтектики $Cu—Cu_2O$ (рис. 6, *б*); Cu_2O как отдельная фаза легко восстанавливается до меди:

$$Cu_2O + 2H \rightarrow 2Cu + H_2O;$$

$$Cu_2O + CO \rightarrow 2Cu + CO_2.$$

8. **Химический состав меди, % (ГОСТ 859—66*)**

Марка	Содержание меди не менее	Примеси, не более									
		Bi	Sb	As	Fe	Ni	Pb	Sn	S	O	Zn	P	Ag	Всего
М00бк	99.99	0.0005	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,0005	—	0,01
М0	(медь+серебро) 99.95	0.001	0.002	0,002	0,004	0,001	0,004	0,002	0,004	—	0,004	—	0,003	0,05
М0б	99.97	0.001	0.002	0,002	0,004	0,002	0,003	0,002	0,004	0,001	0,003	0,002	0,003	0,03
М1	99.90	0.001	0.002	0,002	0,005	0,002	0,005	0,002	0,005	—	0,005	—	0,003	0,1
М1р	99.90	0.001	0.002	0,002	0,005	0,002	0,005	0,002	0,005	—	0,005	0,005—0,006		0,1
М2	(медь+серебро) 99.70	0.002	0,005	0,01	—	—	0,01	0,05	0,01	0,08	—	—	—	0,3
М2р	(медь+серебро) 99.70	0.002	0.005	0,01	0,05	0,2	0,01	0,05	0,01	—	—	0,013—0,060		0,3
М3	(медь+серебро) 99.5	0.003	0.05	0,05	0,05	0,4	0,05	0,05	0,01	0,1	—	—	—	0,5
М3р	99,5	0.003	0.05	0,05	0,05	0,4	0,05	0,05	0,01	—	—	0,02—0,06	—	0,5
М4	99,0	0.005	0.2	0,2	0,1	—	0,3	—	0,02	0,15	—	—	—	1,0

Примечания: 1. По соглашению сторон в меди марок М0 и М1 содержание серебра не определяется.
2. По требованию заводов по обработке цветных металлов катодная медь марок М0 и М1 поставляется с содержанием серы не более 0,003%.
3. По соглашению сторон, в полуфабрикатах, изготовляемых из слитков массой до 1000 кг, в меди марки М1 допускается содержание кислорода не более 0,06%, для слитков массой более 1000 кг — не более 0,08%, для слитков специального назначения (например, для изготовления тонкой проволоки) — не более 0,07 и 0,08% соответственно.
4. В меди марок М0б и М1, предназначенной для электротехнических целей, определяется только электропроводность (электротехническое испытание) и содержание свинца, висмута и кислорода.
5. В катодной меди марок М0 и М1 содержание кислорода и фосфора не нормируется и не определяется.
6. Для меди марок М00бк, М0б и М1, применяемой для электротехнических целей, удельное электрическое сопротивление проволоки при 20°С не должно превышать 0,01724 Ом · мм²/м (электропроводность не менее 58,0 м/(Ом · мм²)].
7. Содержание фосфора в меди марок М1р, М2р и М3р, указанное в минимальных и максимальных пределах, устанавливается по соглашению сторон.
8. Требования к содержанию отдельных примесей в меди марки М00бк, не указанные в стандарте, устанавливаются по соглашению сторон.
9. Медь марок М00бк и М0б должна изготовляться без применения металлических и неметаллических раскислителей. Допускается применение средств, защищающих металлическую ванну от окисления (уголь, генераторный газ, графит и т. д.).

Газы, образующиеся в результате реакций, не растворяются в твердой меди и нарушают металлическую связь между зернами, приводя к образованию трещин — «водородная болезнь» меди. Твердые растворы меди с кислородом имеют исчезающе малые концентрации при низких температурах. Поэтому медь в процессе сварки необходимо тщательно раскислять или вести сварку в среде инертных защитных газов или в вакууме. Остаточные концентрации раскислителей влияют на свойства металла шва (электропроводность, теплопроводность, коррозионную стойкость), и поэтому при сварке изделий из чистой меди задача раскисления металла шва решается с трудом.

9. Физико-механические свойства меди

Свойства	Медь	
	мягкая	твердая
E, кгс/мм²	10 800	—
$\sigma_р$, кгс/мм²	24	—
δ, %	50	6
ψ, %	75	35
$\sigma_г$, кгс/мм²	7	38
$a_н$, кгс·м/см²	16—18	—
Твердость HB	45	120

Диаграмма плавкости системы медь — сера (рис. 7) напоминает рассмотренную диаграмму медь — кислород. Однако содержание серы строго регламентируется ГОСТ 859—66*, и ее присутствие в указанных концентрациях существенно не отражается на процессах сварки. Повышенные концентрации серы будут снижать стойкость металла к образованию горячих трещин. Коррозионная стойкость меди также снижается.

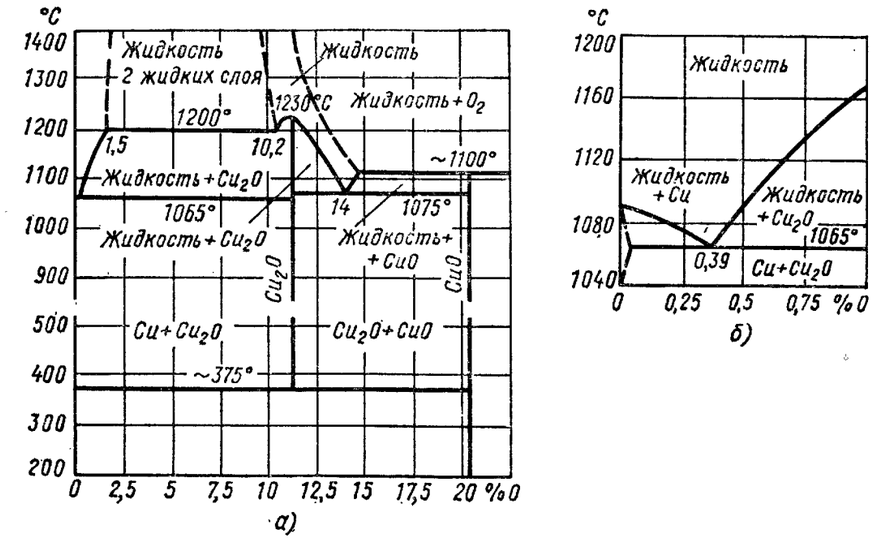


Рис. 6. Диаграмма плавкости системы медь—кислород:
а — общий вид диаграммы; *б* — верхний левый угол

Водород влияет на качество сварных соединений из меди и ее сплавов, вызывая пористость в металле шва и образование трещин. Гидрид меди в виде кристаллов красно-коричневого цвета образуется при взаимодействии атомарного водорода с медью. Мольная теплота образования 5,12 ккал/моль, температура полной диссоциации 333,15 К. Разлагается водой, кислородом, серной и соляной кислотой, а также свободными галогенами (F_2; Cl_2; Br_2; I_2). Таким образом, в условиях сварки его образование мало вероятно, если вообще не исключено. Растворимость водорода в жидкой и твердой меди значительна. Водород раство-

ряется в меди в соответствии с законом Сивертса и растворимость его зависит от температуры и парциального давления в газовой атмосфере при сварке. На рис. 8 приведена изобара растворимости водорода в меди и для сравнения дана изобара растворимости в железе. Растворимость водорода в меди в процессе кристаллизации изменяется относительно больше, чем растворимость в железе (почти в 2 раза); это приводит к тому, что при высокой скорости кристаллизации сварочной ванны при сварке меди, обладающей большой теплопроводностью, газ не успевает выделяться из металла, образуя поры, или, концентрируясь в микронесплошностях, создает высокое давление, приводящее к нарушению металлической связи — образованию трещины. Если правильно разработана технология сварки и исключена возможность насыщения водородом сварочной ванны (сухие газы, прокаленные флюсы и т. д.), то не исключена возможность возникновения дефектов за счет водорода, находящегося в состоянии твердого раствора внедрения в основном металле.

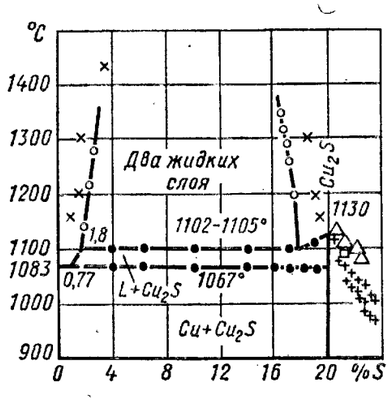


Рис. 7. Диаграмма плавкости системы медь—сера

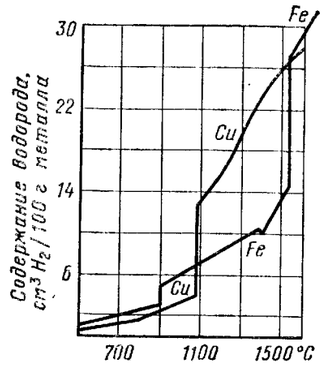


Рис. 8. Изобары растворимости водорода в меди и железе (давление водорода $p_{H_2} = 1$ кгс/мм²)

Высокие температурные градиенты в зоне сварки вызывают термическую диффузию водорода, направленную против потока тепла, т. е. из основного металла к линии сплавления. Концентрация водорода на линии сплавления увеличивается, и коэффициент сегрегации водорода, зависящий от режима сварки ($I_д$; $v_{св}$; δ), достигает больших значений. Таким образом, водород, содержащийся в основном металле, также может создавать дефекты в сварном соединении. Поэтому при сварке ответственных изделий из меди, в которых необходима высокая плотность металла, к основному металлу необходимо предъявлять жесткие требования по содержанию в нем водорода. Электрошлаковый переплав или вакуумная плавка значительно снижают содержание водорода в меди.

Растворимость водорода в меди зависит от содержания в ней кислорода, понижающего растворимость водорода, но в то же время возникновение «водородной болезни» не исключается. Компоненты, легирующие медь, также влияют на растворимость и содержание водорода в медных сплавах.

Влияние легирующих компонентов. Основными типами сплавов на основе меди являются латуни и бронзы. Составы сплавов на основе меди определяются:

ГОСТ 15527—70 — сплавы медно-цинковые (латуни), обрабатываемые давлением;
ГОСТ 17711—72 — сплавы медно-цинковые (латуни) литейные;
ГОСТ 493—54** — бронзы безоловянные;
ГОСТ 18175—72 — бронзы безоловянные, обрабатываемые давлением;

ГОСТ 5017—74 — бронзы оловянные, обрабатываемые давлением;
ГОСТ 614—73 — бронзы оловянные в чушках;
ГОСТ 613—65 — бронзы оловянные литейные.

Латуни и томпак являются в основном медно-цинковыми сплавами. Марка латуни определяется по содержанию меди. Например, латунь марки Л63 содержит 63% Cu и 37% Zn. Они могут иметь сложный состав за счет легирования другими компонентами. Латунь и томпак содержат цинк в пределах α-твердого раствора по диаграмме плавкости Cu—Zn, т. е. до 38% Zn. Таким образом, латунь Л63 является предельным сплавом, сохраняющим структуру твердого раствора, а латунь Л60 с содержанием 40% цинка уже имеет β′-фазу. В пределах α-твердого раствора свойства латуней монотонно изменяются, увеличивая прочность меди и снижая ее пластичность. Латуни обладают хорошей коррозионной стойкостью, теряя ее только в аммиачной среде, так как аммиак, являясь активным лигандом при образовании комплексных соединений с медью и с цинком, разрушает защитные слои (аммиачное растрескивание). При больших содержаниях цинка образуются интерметаллиды (CuZn, $CuZn_2$ и т. д.), резко изменяющие механические свойства медных сплавов. Сварка изделий из латуни сопровождается потерей цинка ввиду его высокой летучести (температура кипения 907° С). Специальные латуни кроме цинка могут содержать железо, алюминий, кремний, никель и другие компоненты (ЛА77-2, ЛАЖ60-1-1 и т. д.).

Бронзы представляют собой сплавы меди с содержанием цинка не более 4—5%. Главными легирующими компонентами бронз являются Al, Mn, Si, Be, Sn, Cr. Бронзы могут иметь и сложный состав при легировании сразу несколькими компонентами; например, бронза БрКМц3—1 содержит 3% Si и 1% Mn.

Бронзы оловянные содержат до 10% Sn, т. е. до предельного содержания его в твердом растворе. Механические свойства бронз изменяются постепенно, и с повышением предела прочности при растяжении наблюдается снижение пластичности. Многокомпонентные бронзы кроме олова могут содержать фосфор (БрОФ6,5—0,4), цинк (БрОЦ4—3), свинец (БрОЦС4—4—4). Бронзы, содержащие цинк и свинец, обладают высокими антифрикционными свойствами и употребляются для подшипников скольжения. Наличие в составе бронз фосфора или свинца ухудшает их свариваемость, так как расширяется интервал кристаллизации за счет образования легкоплавких эвтектик.

Бронзы безоловянные алюминиевые обладают высокими механическими свойствами и высокой коррозионной стойкостью. Содержание алюминия в них находится в пределах α-твердого раствора (до 11,0% Al). Многокомпонентные алюминиевые бронзы содержат железо (БрАЖ9—4), марганец (БрАЖМц10—3—1,5) и др. Сварка алюминиевых бронз затруднена образованием тугоплавкой окиси алюминия Al_2O_3, что приводит к плохому формированию шва, загрязнению металла шва шлаковыми включениями. Требуется тщательная подготовка кромок под сварку или пайку.

Бронзы безоловянные марганцовистые обладают хорошими механическими свойствами, так как марганец, упрочняя медь, в меньшей степени снижает ее пластичность. Диаграмма плавкости Mn—Cu представляет собою систему твердых растворов, но свыше 20% Mn в состав бронз не вводят, так как возникают дополнительные фазы за счет распада твердых растворов при низких температурах; при этом сплав теряет однофазное строение. Марганцовистые бронзы обладают хорошей коррозионной стойкостью и жаропрочностью. Свариваемость удовлетворительная.

Бронзы безоловянные кремнистые имеют сложный состав и содержат дополнительно марганец (БрКМц3—1), никель и другие элементы. Диаграмма плавкости Si—Cu сложная, а область α-твердого раствора заканчивается на 3,5% Si. Кремнистые бронзы обладают высокими механическими свойствами, высокой коррозионной стойкостью, большой износостойкостью, однако у них уже утрачена высокая тепло- и электропроводность меди. Эти бронзы хорошо свариваются, а иногда их можно сваривать и без защиты, так как в их составе находятся такие сильные раскислители, как кремний и марганец.

Бронзы безоловянные хромистые представляют собой упрочненные сплавы меди с хорошими механическими свойствами ($\sigma_в = 26 \div 28$ кгс/мм²), но сохраняющие ценные физические свойства (электро- и теплопроводность почти на уровне чистой меди). Хром образует с медью твердые растворы небольшой концентрации (до 0,65% Cr), и обычная структура бронзы БрХ0,5 представляет собой α-твердый раствор хрома в меди и мелкие кристаллы хрома в результате распада твердого раствора. При больших концентрациях хрома его включения грубее, но при сварке бронзы БрХ0,5 структура металла в зоне шва улучшается. Свариваемость хромистых бронз при надлежащей технологии хорошая.

Бронзы безоловянные бериллиевые представляют собой термически упрочняемые сплавы, так как граница твердых растворов исчезает при 300° С. В упрочненном состоянии бронза БрБ2 — немагнитный сплав, обладающий механическими свойствами, соответствующими свойствам стали; из него изготовляют пружины и гибкие элементы. Обладает высокой коррозионной стойкостью. Сваривается хорошо, но при сварке следует организовать усиленную вентиляцию и защиту оператора-сварщика.

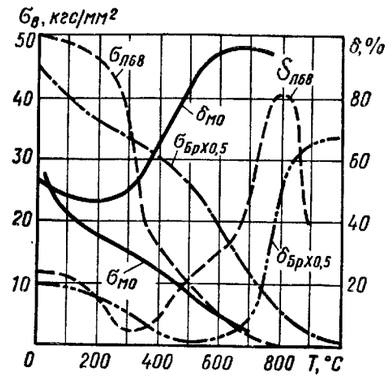


Рис. 9. Изменение механических свойств меди и ее сплавов в зависимости от температуры

Медноникелевые сплавы (МН95-5) свариваются хорошо, так как представляют собой неограниченные твердые растворы. Возможна повышенная пористость, так как никель, растворяя водород, может им обогащать металл сварного шва.

Железо входит как компонент сложнолегированных бронз и латуней. На свариваемость существенно не влияет, так как содержится в малых концентрациях. Диаграмма плавкости железо—медь сложная и указывает на образование двух твердых растворов: медь в железе и железо в меди, а кроме того, имеется область ликвации в жидком состоянии. Сложность медно-железных сплавов начинает проявляться при наплавке меди на сталь и при сварке меди и ее сплавов с железом. Медь обладает высокой диффузионной способностью по границе зерен сталей и может глубоко проникать в приповерхностные слои. Повышение содержания углерода в стали препятствует этим процессам. Их также можно регулировать в процессе сварки, сокращая время пребывания меди и ее сплавов в жидком состоянии.

Свинец и висмут резко ухудшают свариваемость меди и ее сплавов, образуя легкоплавкие эвтектики. В сплавах (ЛС63-3, БрОЦС4—4—4 и др.) свинец присутствует в виде глобулярных включений, улучшая антифрикционные свойства. Сварку следует вести при жестком закреплении, освобождая изделия при охлаждении ниже температуры ~300° С.

Сера и фосфор ухудшают свариваемость медных сплавов. Хотя фосфор является хорошим раскислителем для медных сплавов, его присутствия при сварке следует избегать. Влияние серы при сварке меди аналогично ее влиянию при сварке сталей.

Общие рекомендации по сварке. Общие вопросы свариваемости определяются влиянием термического цикла сварки на физические свойства металла — его прочность и пластичность. Для меди эти свойства будут также зависеть от степени ее чистоты. Так, медь, содержащая повышенную концентрацию водорода, может иметь провал пластичности (δ) в интервале 350—450° С, который для чистой меди обычно не регистрируется. На рис. 9 приведены температурные зависимости изменения прочностных свойств ($\sigma_в$; δ) для чистой меди, латуни Л68 и бронзы БрХ0,5. В области высоких температур латунь Л68 подвергается разупрочнению, в то время как бронза БрХ0,5 еще сохраняет значительную прочность.

К сварным соединениям из чистой меди почти всегда предъявляют высокие требования по сохранению в металле сварных швов всего комплекса физических свойств: электропроводности, теплопроводности, плотности и коррозионной стойкости, так как эти изделия работают в тяжелых условиях эксплуатации. Поэтому в процессе сварки медь не должна загрязняться какими-либо примесями, влияющими на эти свойства. Особенно высокие требования предъявляются к сварке вакуум-плотных швов в изделиях электронной техники, в энергетических установках, в узлах аппаратуры, работающей с внутренним охлаждением. Механические свойства сварных соединений определяются общими свойствами меди.

Сварка чистой меди существенно отличается от сварки сталей. Большие тепло- и температуропроводность создают высокие градиенты температуры и скорости охлаждения, а также малое время пребывания сварочной ванны в жидком состоянии. Это обусловливает необходимость применения повышенной погонной энергии при сварке меди по сравнению со сталями или применения предварительного подогрева изделия, но последнее является нежелательным осложнением технологии сварки. Значительный коэффициент линейного расширения и его зависимость от температуры вызывают необходимость сварки при жестком закреплении изделия или по прихваткам. При большой толщине металла следует регулировать ширину зазора при сварке. Малое время существования сварочной ванны в жидком состоянии ограничивает возможности ее металлургической обработки. В частности, при раскислении меди требуются более активные раскислители, чем при сварке сталей, для снижения концентрации кислорода до допустимых пределов. Высокие градиенты температуры способствуют развитию термической диффузии водорода в зоне термического влияния, что приводит к обогащению водородом металла вблизи зоны сплавления и увеличивает вероятность возникновения дефектов (пор, трещин).

Высокая чувствительность меди к водороду должна учитываться при разработке технологии сварки. Выбор технологического процесса сварки изделия в первую очередь определяется его назначением, сложностью (наличие коротких или криволинейных швов в различных пространственных положениях, труднодоступных мест), а также числом изготовляемых изделий (серия) и требованиями, предъявляемыми к их качеству.

К высокопроизводительным процессам относятся *электродуговая сварка под флюсом плавящимся электродом*, *электрошлаковая сварка* металла больших толщин, и их следует использовать при серийном производстве или на заготовительных операциях. При соответствующей подготовке сварочных материалов (прокалке флюса до 400—450° С) эти виды сварки обеспечивают хорошие результаты (защиту и малое загрязнение металла шва, относительно невысокие температурные градиенты, снижающие влияние водорода).

При единичном производстве и ремонтных работах рекомендуется использовать *газовую сварку*, в процессе которой осуществляется подогрев и начальная термическая обработка изделия. Невысокие температурные градиенты уменьшают воздействие сварочного термического цикла на металл в зоне сварки (шов, зона термического влияния). Возможно раскисление и легирование металла через присадочную проволоку. Газовую сварку можно применять как для чистой меди, так и для ее сплавов.

Ручная дуговая сварка покрытыми электродами приводит к загрязнению металла шва легирующими компонентами, что нарушает физические свойства металла шва по сравнению с чистой медью. Сварка медных сплавов (бронз) идет удовлетворительно, но в латунях при этом теряется цинк за счет испарения и окисления.

Дуговую сварку в защитных газах, широко применяемую в сварочной технике, используют также для изготовления сварных изделий из меди и ее сплавов. Для сварки изделий из чистой меди чаще используют сварку неплавящимся

вольфрамовым электродом в среде аргона, гелия или азота. Защитные газы должны быть особо чистыми. Стойкость вольфрамового электрода в чистом азоте вполне удовлетворительная, и применение этого недефицитного и недорогого газа обеспечивает значительный экономический эффект. Несмотря на применение защиты инертными газами, при сварке происходит окисление меди, и для ее раскисления следует применять микролегированные присадочные проволоки, содержащие сильные раскислители (титан, цирконий, бор, редкоземельные металлы). В результате этого можно получить металл шва со свойствами на уровне чистой меди (М1). Для сварки сплавов меди в защитных газах (Ar и He) можно использовать присадочные проволоки, по составу совпадающие с основным металлом или содержащие небольшое количество раскислителей (Si и Mn). Сварку меди в среде защитных газов плавящимся электродом применяют реже, так как в этом случае капли электродного металла подвергаются существенному перегреву.

При сварке меди и ее сплавов электрической дугой в защитных газах в зоне сварки создаются высокие градиенты температур и, следовательно, условия для диффузии водорода в зоне термического влияния. При достаточном количестве водорода, растворенного в основном металле, вероятно возникновение дефектов (пор, трещин). Поэтому при сварке изделия из меди и ее сплавов следует контролировать содержание водорода в основном металле, так как его содержание в зоне сплавления, учитывая коэффициенты сегрегации, может оказаться выше допустимого. Выравнивание концентраций водорода, создавшихся в процессе сварки, возможно в результате последующей термической обработки.

Медь можно сваривать в воздушной атмосфере без защиты, но в этом случае проволока должна содержать раскислители высоких концентраций, и металл шва, удовлетворяя по механическим свойствам, будет существенно отличаться от основного металла по тепло- и электропроводности.

Медь, как металл высокой пластичности, хорошо сваривается всеми видами сварки термомеханического класса, кроме контактной сварки, так как обладает малым переходным электрическим сопротивлением. Для приварки выводов из тонких медных проволок в изделиях электронной техники используют термокомпрессионную сварку. Для более крупных изделий сложной конфигурации широко применяют диффузионную сварку в вакууме, позволяющую получать соединения меди не только с медью, но и с другими металлами и даже неметаллическими материалами. Основным преимуществом диффузионной сварки в вакууме является отсутствие остаточных напряжений, если свариваются однородные материалы. В случае сварки разнородных металлов различие в коэффициентах линейного расширения соединяемых металлов может привести к возникновению температурных напряжений.

Холодную сварку меди пластической деформацией сдвига или сдавливания используют для сварки медных шин в энергетических установках. Она обеспечивает удовлетворительное электрическое сопротивление сварных соединений.

Газовая сварка. Для меди используют ацетилено-кислородную сварку, обеспечивающую наибольшую температуру ядра пламени. Газовая горелка — тепловой источник малой сосредоточенности; поэтому поддержание нормальных размеров сварочной ванны затрудняется. Для изделия толщиной более 10 мм рекомендуется применять две горелки, из которых одна осуществляет подогрев, а вторая служит для сварки. При двусторонней сварке двумя горелками необходимость подогрева отпадает. Расход ацетилена (л/ч): $v_{C_2H_2} = 150\,\delta$ при $\delta < 10$ мм; $v_{C_2H_2} = 200\,\delta$ при $\delta > 10$ мм; при двух горелках расход ацетилена: на подогрев $v_{C_2H_2} = 150 \div 200\,\delta$, на сварку $v_{C_2H_2} = 100\,\delta$. Для сварки меди и бронз используют нормальное пламя

$$\beta = \frac{v_{O_2}}{v_{C_2H_2}} = 1{,}05 \div 1{,}10,$$

а для сварки латуней $\beta = \frac{v_{O_2}}{v_{C_2H_2}} = 1{,}3 \div 1{,}4$ (с целью уменьшения потерь цинка).

Раскисление металла сварочной ванны, несмотря на защиту от окружающей среды продуктами сгорания, производится извлечением закиси меди флюсами или введением раскислителей через присадочную проволоку.

Сварочные флюсы для меди содержат соединения бора (борная кислота, борный ангидрид, бура), которые растворяют закись меди, образуя легкоплавкую эвтектику, и выводят ее в шлак. Кроме соединений бора, флюсы могут содержать фосфаты и галиды (табл. 10).

10. Составы флюсов для сварки меди и ее сплавов, %

Компоненты	Флюсы					
	1	2	3	4	5	6
Борная кислота H_3BO_3	100	—	50	25	35	—
Бура безводная $Na_2B_4O_7$	—	100	50	75	50	56
Бифосфат натрия Na_2HPO_4	—	—	—	—	15	—
Поташ безводный K_2CO_3	—	—	—	—	—	22
Хлористый натрий NaCl	—	—	—	—	—	12

Флюсы наносят на зачищенные и обезжиренные свариваемые кромки по 10—12 мм на сторону. Дополнительно их можно вносить с помощью присадочного металла, на который наносят покрытие из компонентов флюса и жидкого стекла с добавками древесного угля (10—20%). При сварке алюминиевых бронз в состав флюса надо вводить фториды и хлориды, растворяющие Al_2O_3, который получается при окислении алюминия в составе бронзы (табл. 11).

11. Флюсы для сварки алюминиевых бронз

Компоненты	Содержание во флюсах, %			Компоненты	Содержание во флюсах, %		
	1	2	3		1	2	3
Хлористый:				Фтористый:			
натрий NaCl	30	45	28	натрий NaF	—	—	8
калий KCl	45	30	50	калий KF	7	15	—
литий LiCl	15	10	14	Бифосфат натрия Na_2HPO_4	3	—	—

Для сварки меди, и особенно для латуни, удобно применять газообразные флюсы, разработанные ВНИИавтогенмашем, представляющие собой азеотропный раствор борнометилового эфира с метиловым спиртом. Пары этого раствора поступают через флюсопитатель в горелку; пламя окрашивается в зеленый цвет (спектральный цвет B), органическая часть сгорает, а B_2O_3 взаимодействует со сварочной ванной.

При сварке изделия из чистой меди толщиной до 3—4 мм применяют проволоку из меди М1 или М2, так как медь не успевает существенно окисляться. При больших толщинах меди для сварки следует применять присадочную проволоку, легированную раскислителями (до 0,2% P и 0,3% Si). Состав присадочной проволоки для сварки медных сплавов должен совпадать с составом основного металла. Применение раскислителей (Si, Mn, Al) не лимитируется так жестко, как при сварке меди. При сварке латуней для уменьшения потерь цинка в качестве присадочного металла следует применять кремнистую латунь (ЛК80-3). Проковка шва после сварки в холодном состоянии для меди толщиной до 4—5 мм повышает прочностные и пластические свойства. При большой толщине проковку ведут после подогрева до 400—300° С с последующим отжигом.

Сварка меди угольным электродом. Сварку меди и ее сплавов осуществляют дугой, горящей между изделием и угольным электродом, или независимой дугой, горящей между двумя угольными электродами. Дуговой разряд является источником энергии при сварке. Все технологические приемы, составы флюсов, присадочного металла остаются такими же, как и при газовой сварке. Используя проволоку БрКМц3—1, можно вести сварку меди на воздухе. Полученные соединения удовлетворяют требования к механическим свойствам, но электро- и теплофизические свойства будут резко снижены. Сварку меди и ее сплавов угольным электродом применяют редко, так как это малопроизводительный процесс.

Ручная дуговая сварка покрытыми электродами. Ручная электродуговая сварка электродами с покрытием позволяет получить удовлетворительные механические свойства сварных соединений, но состав металла шва будет существенно отличаться от состава основного металла из-за легирования раскислителями при сварке. Раскислители при сварке меди вводят в электродную проволоку и в электродное покрытие. Составы металлических стержней и покрытий приведены в табл. 12 и 13.

12. Химический состав (%) медных сплавов, используемых для изготовления проволок для электродных стержней

Марка проволоки	Cu	Sn	Si	Mn	P	Zn	Примеси, не более
М1	99,9	—	—	—	—	—	0,10
БрКМц3—1	Остальное	—	2,75—3,5	1,0—1,5	—	—	0,10
БрОФ4—0,25	—	3,5	—	—	0,3	—	1,50
Л90	88—91	—	—	—	—	Остальное	0,2

13. Состав электродных покрытий (сухая шихта), %

Покрытие 3Т		Покрытие К-100	
Марганцевая руда	17,0	Полевой шпат	12,5
Плавиковый шпат	32,0	Плавиковый шпат	15,0
Графит серебристый	16,0	Ферромарганец (низкоуглеродистый)	47,5
Ферросилиций	32,0		
Алюминий в порошке	2,5	Кремнистая медь	20,0

Сухую шихту замешивают на жидком стекле (класс А), которое составляет 20—25% массы шихты. Технология соответствует технологии изготовления электродов основного типа. Механические свойства сварных соединений приведены в табл. 14. Тепло- и электропроводность сварных соединений значительно ниже, чем у чистой меди, особенно при сварке электродами из сплавов меди.

При сварке покрытыми электродами наблюдается сильное разбрызгивание. Металл шва часто содержит поры. Наиболее широкое применение получили электроды с покрытием К-100 (завод «Комсомолец»). При сварке меди и ее сплавов толщиной более 4—5 мм рекомендуется подогрев до 300—500° С. В последнее время московским электродным заводом разработаны новые электроды (ОМЗ-1, ТУ 14-16.8-17—76) для сварки меди. Они снижают легирование металла шва и повышают механические свойства сварного соединения по сравнению с ранее применявшимися электродами.

14. Механические свойства металла шва

Покрытие	Металл электродного стержня	$\sigma_в$, кгс/мм²	α°
К-100	М1	18—20	180
3Т	М1	17—20	150—180
	БрКМц3—1	19—23	180
	БрОФ4—0,25	20—23	180
	Л90	20—23	180

15. Режимы сварки меди под флюсом угольным электродом (напряжение 19—20 В; ток 100 А)

Толщина свариваемого металла, мм	Размеры присадочного металла, мм		Время подогрева, с	Скорость сварки, м/ч
	Ширина	Толщина		
5	12	5	3—5	20
10	14	10	10—15	6—8

Среднее содержание легирующих элементов: Mn $\leqslant 0{,}75\%$; Si $\leqslant 0{,}20\%$; Fe — следы. Механические свойства сварного соединения: $\sigma_в \simeq 20$ кгс/мм²; $\delta = 25\%$; $a_н = 5$ кгс·м/см².

Дуговая сварка под флюсом. Дуговую сварку меди и ее сплавов под флюсом можно осуществлять под слоем плавленого флюса неплавящимся угольным или графитовым электродом, плавящимся электродом и плавящимся электродом под слоем керамического флюса.

При сварке под флюсом угольным (графитизированным) электродом, электрод затачивают в виде плоской лопатки. Сборку под сварку производят с закладкой встык присадочного металла (латуни, томпака) для раскисления металла шва. Засыпают прокаленный флюс ОСЦ-45. Сварку ведут на постоянном токе обратной полярности; подогрев тока создается в результате замыкания электрода на изделие. Режимы сварки приведены в табл. 15.

Механические свойства металла шва, полученного на графитовой подкладке при сварке меди М1 толщиной 5 мм: $\sigma_в = 18 \div 19$ кгс/мм²; $\delta = 25 \div 33\%$.

Возможно дальнейшее упрочнение путем обкатки роликами. Сборка под сварку, смена и заточка угольных электродов снижают производительность сварки этого вида.

16. Физические свойства сварных швов из меди

Металл	ρ, Ом·мм²/м	σ, м/(см·мм²)	λ, кал/(см·с·°С)
Основной	0,0171	58,5	0,96
Электродный	0,0176	56,3	0,93
Шва, сваренного под флюсом:			
АН-20	0,0191	52,4	0,86
АН-348А	0,0269	37,1	0,52
АН-М1	0,0174	57,5	0,945

17. Режимы сварки меди под флюсом К-13 МВТУ (проволока М1; скорость сварки 21 м/ч)

Толщина металла, мм	Диаметр проволоки, мм	Напряжение, В	Ток, А
1—2	1—2	26—27	160—180
5—6	2—3	28—30	400—500

Сварка под плавленными флюсами плавящимся электродом является высокопроизводительным способом. Состав металла шва при сварке меди изменяется незначительно, и металл сохраняет свои физические свойства (табл. 16).

Лучшие результаты получаются при сварке под флюсом АН-М1, имеющим состав: 55% фтористого магния, 40% фтористого натрия, 5% фтористого бария. В качестве электродного металла используют проволоки из меди М1 или М0. Для повышения механических свойств сварного соединения применяют и легированные проволоки из медных сплавов БрКМц3—1; БрАЖМц10—3—1,5, но в этом случае снижаются тепло- и электропроводность металла шва. Сварку

выполняют на постоянном токе обратной полярности; коэффициент расплавления электродной проволоки около 20 г/(А·ч). При сварке меди толщиной более 15 мм рекомендуется разделка под углом 90° с притуплением или сварка расщепленным электродом. Сварку осуществляют на графитовой подкладке или на флюсовой подушке. Подготовка кромок и электродной проволоки должна быть тщательной — зачистка до металлического блеска и обезжиривание. Флюс должен быть прокален при 300—400° С. Сварку ведут при жестком закреплении или по прихваткам. Режимы сварки меди под флюсами АН-20, АН-26 и АН-М1 можно определить по рис. 10.

Для сварки латуни марок Л63 и Л062-1 применяют медную проволоку с использованием плавленого флюса МАТИ-5 или АНФ-5. Этот способ сварки допускает получение сварных соединений из меди со сталью. При сварке в этом случае электрод смещают на медь и подбирают такой режим, чтобы жидкая медь контактировала со сталью минимальное время во избежание хрупких прослоек (диффузия меди между зернами стали).

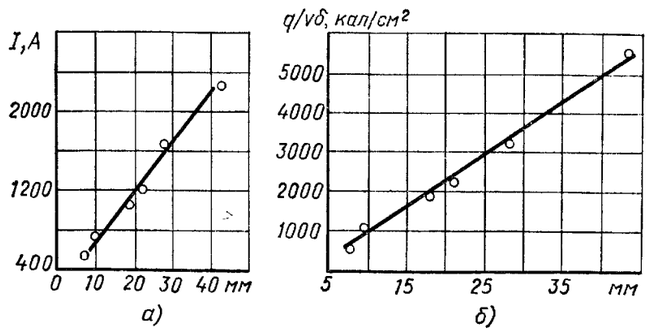


Рис. 10. Выбор режимов сварки меди под флюсами (АН-20; АН-26; АН-М1) в зависимости от толщины металла:

а — сварочный ток *I*; *б* — минимальная удельная погонная энергия $q/v\delta$

Керамический флюс К-13 МВТУ применяют при сварке меди, меди со сталями и наплавке меди на сталь. В состав флюса входят компоненты, %: глинозем 20; плавиковый шпат 20; кварцевый песок 8—10; магнезит 15; мел 15; бура безводная 15—19; порошок алюминия 3—5. Шихту замешивают на жидком стекле, гранулируют и после сушки прокаливают в течение 1—2 ч при 450° С. Сварку ведут на постоянном токе обратной полярности (табл. 17) при жестком закреплении на подкладке из охлаждаемой меди (толщиной до 2,5 мм) или на графите (толщиной 5—6 мм).

Применение керамического флюса, кроме хорошего раскисления металла шва, позволяет легировать металл шва нужными компонентами (хромом, никелем и др.) через флюс. Электро- и теплопроводность металла шва получается на уровне электро- и теплопроводности основного металла. Механические свойства сварного соединения также приближаются к свойствам основного металла. Для сварки меди можно применять также флюс ЖМ-1, хорошо стабилизирующий дуговой разряд и позволяющий вести сварку на переменном токе. Состав флюса ЖМ-1, %: мрамор 28; полевой шпат 57,6; плавиковый шпат 8, древесный уголь 2,2; борный шлак 3,5; алюминий 0,7.

Электрошлаковая сварка меди и ее сплавов. Сварку меди большой толщины (30—55 мм) можно осуществлять электрошлаковым процессом с пластинчатым электродом. В ИЭС Е. О. Патона разработаны флюсы для этого процесса, содер-

жащие фториды щелочных и щелочноземельных металлов. Температура плавления флюсов должна быть ниже температуры плавления меди. Механические свойства металла шва мало отличаются от свойств основного металла: $\sigma_в = 19 \div 20$ кгс/мм²; $\delta = 46 \div 47\%$; $a_н = 16$ кгс·м/см².

Дуговая сварка в защитных газах. Автоматическую, полуавтоматическую и ручную сварку меди в среде защитных газов можно производить плавящимся и неплавящимся (вольфрамовым) электродом. Наиболее часто для чистой меди применяют сварку вольфрамовым электродом (для толщин до 10 мм) с подачей присадочной проволоки, реже — сварку плавящимся электродом. Применяют защитные газы: аргон высшего сорта по ГОСТ 10157—73, гелий особой чистоты по МРТУ 6-02-274—66, азот особой чистоты по МРТУ 6-02-375—66. Наиболее целесообразно применять азот высокой чистоты, в котором эффективный и термический КПД дугового разряда выше, чем для аргона и гелия. При сварке в азоте глубина проплавления получается выше, чем при сварке в аргоне и гелии, но устойчивость дугового разряда в азоте ниже, чем в аргоне и гелии. Эти результаты объясняются наличием мощных плазменных потоков в дуге, горящей в азоте, и более высоким запасом энтальпии азотной плазмы (диссоциация N_2). Однако при сварке в труднодоступных местах или при сварке меди малой толщины ($\delta < 1$ мм) предпочтение следует отдать аргону, как защитному газу, в котором наблюдается наибольшая устойчивость дугового разряда. Несмотря на высокую чистоту защитных газов, медь при сварке подвергается окислению, и может возникать пористость, что определяет необходимость применения легированных присадочных и электродных проволок.

Сварку меди неплавящимся вольфрамовым электродом осуществляют на постоянном токе прямой полярности; используют электрод из лантанированного вольфрама, который обладает удовлетворительной устойчивостью в защитных газах, в том числе, и в азоте особой чистоты. При сварке электрод располагают строго в плоскости стыка, наклон электрода 60—80° «углом назад». При сварке меди толщиной более 4—5 мм рекомендуется подогрев до 300—400° С.

Присадочные проволоки из чистой меди М1 и М0 при сварке обеспечивают получение металла шва, по составу и физическим свойствам близкого к основному металлу, однако механические свойства сварного соединения понижены, а пористость уменьшает плотность металла шва. При введении в состав присадочных проволок раскислителей и легирующих компонентов механические свойства сварного соединения возрастают, но, как правило, снижаются тепло- и электропроводность металла шва, что недопустимо при сварке ответственных изделий из чистой меди. В таких случаях рекомендуются присадочные проволоки, легированные сильными раскислителями (в микроколичествах), которые после сварки не остаются в составе твердых растворов, а переходят в свои соединения (высокодисперсные, шлаковые включения), и поэтому не влияют на физические свойства металлов. Аргонодуговая и азотно-дуговая сварки будут различаться по составу присадочных проволок, так как в азоте возможно образование нитридов некоторыми легирующими компонентами. Составы присадочных проволок приведены в табл. 18 и 19.

Присадочные проволоки, приведенные в табл. 20, позволяют получить металл шва с физическими и механическими свойствами на уровне свойств основного металла М1; коррозионная стойкость сварных соединений такая же как и у основного металла. Рекомендуемые режимы сварки приведены в табл. 20.

При сварке меди плавящимся электродом в защитных газах капли металла проходят через дуговой промежуток, перегреваются и подвергаются более сильному окислению за счет воздушной атмосферы, попадающей в струю защитного газа. Поэтому для электродного металла употребляются проволоки из медного сплава марок БрКМц3—1, МНЖКТ5-0,2-0,2. Металл шва утрачивает физические свойства чистой меди, но по механическим свойствам сварные соединения получаются удовлетворительные.

Электродную проволоку и кромки основного металла зачищают до блеска и обезжиривают. Медь толщиной до 5—6 мм можно сваривать без разделки кро-

мок. Для сварки вакуумно-плотных швов выполняют разделку «вакуумный замок» с обязательной проваркой корневого шва. Сварку осуществляют на подкладках из прокаленного графита или медных пластин, охлаждаемых водой. Чрезмерное охлаждение медной подкладки и появление точки росы может вызвать пористость в нижней части шва. Медь толщиной более 5 мм сваривают на флюсовой подушке. Швы большой протяженности сваривают по прихваткам, проставленным с шагом 300—400 мм.

18. Присадочные проволоки для сварки меди неплавящимся электродом

Сплав для проволоки	Легирующие компоненты, % (медь остальное)
БрКМц3—1	1,0—1,5 Mn; 2,75—3,07 Si;
МНЖКТ5-1-0,2-0,2	5,0—6,0 Ni; 1—1,4 Fe; 0,3—0,8 Mn; 0,15—0,3 Si; 0,1—0,3 Ti
БрХ0,5	0,4—1,0 Cr
БрОЦ4—3	3,5—4 Sn; 2,7—3,3 Zn
БрОФ6,5—0,4	6—7 Sn; 0,26—0,4 P

19. Присадочные проволоки для сварки чистой меди

Сплав для проволоки	Защитный газ	Легирующие компоненты, % (медь остальное)
МР3ТЦрБО, 1-0,1-0,1-0,1	Азот	0,08—0,14 РЗМ; 0,08—0,14 Ti; 0,08—0,14 Zn; 0,08—0,14 B
МР3ТБО1-0,1-0,08	Аргон	0,08—0,14 РЗМ; 0,08—0,14 Ti; 0,05—0,10 B

20. Рекомендуемые режимы сварки меди неплавящимся электродом в среде защитных газов; соединение стыковое на медной подкладке или флюсовой подушке

Толщина металла, мм	Зазор между кромками, мм	Ток, А	Напряжение, В	Скорость сварки, м/ч	Температура подогрева, °С	Расход газа, л/мин
Аргонодуговая сварка						
2	0—0,5	100—120	10—14	25—30	Нет	10—12
3	0,5—1,0	200—220	11—15		«	12—14
4	1,0—1,5	380—400	12—16	30—35	300—400	
Азотно-дуговая сварка						
2	0—0,5	70—90	20—24	20—22	Нет	16—18
3	0,5—1,0	120—140	22—26	20—22		18—20
4	1,0—1,5	180—200	24—28	18—20		
6		260—280	26—30	16—18		20—22
8	1,0—1,5	380—400	30—35	12—14		
10		400—420	31—36		400—600	22—24

Дуговую сварку латуней и других сплавов меди, содержащих цинк, рекомендуется вести с низкоопущенным соплом. Расход защитного газа зависит от его плотности и теплофизических свойств (л/мин): аргона 8—10, гелия 10—12, азота 10—14.

Сварку меди плавящимся электродом в воздушной атмосфере можно производить электродной проволокой, сильно легированной активными раскислителями — редкоземельными металлами. Этот вид сварки применяется на заводе «Комсомолец».

Особенности сварки биметалла медь—сталь, наплавки меди на поверхность стали и сварки меди со сталью. При осуществлении этих технологических операций возможно возникновение хрупких слоев за счет интенсивного проникновения меди в поверхностные слои стали по границам зерен. Процесс проникновения определяется температурой и временем контактирования жидкой меди с твердой сталью. Для уменьшения проникновения меди по границам зерен процесс сварки меди со сталью или процесс наплавки меди на сталь надо производить при минимальной погонной энергии и с минимальной глубиной проплавления, используя дополнительное охлаждение для ускорения кристаллизации медного слоя.

Наплавку меди на сталь можно производить, используя различные способы сварки, соблюдая указанные выше условия. Хорошие результаты можно получить при наплавке под флюсом [5] плавящимся электродом, подающимся автоматической головкой, совершающей колебания в плоскости, перпендикулярной к поступающему движению. Стальную поверхность можно охлаждать со стороны, противоположной наплавке, или охлаждать непосредственно металл наплавки водоохлаждаемыми устройствами. При наплавке меди в среде аргона плавящимся электродом следует соблюдать аналогичные условия.

При сварке меди со сталью плавящимся электродом надо электрод отклонять в сторону меди, так как магнитное дутье в процессе сварки будет возвращать дуговой разряд на свариваемые кромки. При сварке необходимо применять минимальные токи, обеспечивающие формирование сварного шва.

Сварку биметалла медь — сталь можно осуществлять со стороны плакирующего слоя или со стороны стали. В первом случае неизбежны удаление плакирующего слоя на стыкуемых кромках, сварка стали, зачистка полученного шва и наплавка меди на сталь для восстановления плакирующего слоя. При возможности сварки со стороны стали плакирующий медный слой в зоне сварки не удаляют; после сварки стали производят заварку стыка на плакирующем слое любым способом. Разделку кромок и конструктивные размеры сварных соединений принимают по ГОСТ 16098—70.

Список литературы

1. **Евсеев Г. Б., Глизманенко Д. Л.** Оборудование и технология газопламенной обработки металлов и неметаллических материалов. М., «Машиностроение», 1974, с. 112—122.

2. **Клячкин Я. Л.** Сварка цветных металлов и сплавов. М., «Машиностроение», 1964, 336 с.

3. **Коренюк Ю. М.** Сварка меди под флюсом. М., «Машиностроение», 1967, с. 5—60.

4. **Лычко И. И., Илющенко В. М., Алексеев А. П.** Электрошлаковая сварка толстолистовой меди. — «Автоматическая сварка», 1967, № 10, с. 80.

5. **Смирягин А. П.** Промышленные цветные металлы и сплавы. М., Металлургиздат, 1956. 559 с.

6. **Справочник** по сварке. Под ред. А. И. Акулова. Т. 4. М., «Машиностроение», 1971. 415 с.

7. **Фролов В. В., Арутюнова И. А.** Автоматическая сварка и наплавка меди и ее сплавов под керамическими флюсами. Кн.: Сварка цветных металлов. МДНП, 1961, с. 41—54.

8. **Фролов В. В., Ермолаева В. И.** О неравномерности распределения водорода в меди при сварке. — «Сварочное производство», 1975, № 12, с. 28—29.

Глава 12
СВАРКА НИКЕЛЯ И НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

СОСТАВ И СВОЙСТВА НИКЕЛЯ И НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Никель и никелевые сплавы (содержащие 55% Ni и более) являются важнейшими конструкционными материалами. Благодаря высокой коррозионной стойкости, жаропрочности и жаростойкости их широко используют в химической и нефтехимической промышленности, энергетике, электронике и других отраслях промышленности.

При нагреве никель не претерпевает никаких фазовых превращений, которые усложняли бы его структуру. Он имеет гранецентрированную кубическую решетку и обладает физическими свойствами, схожими со свойствами сплавов железа аустенитной фазы. Никель используют для переработки на полуфабрикаты (листы, ленты, полосы и т. д.), как конструкционный материал и для изготовления сплавов на никелевой основе (табл. 1 и 2).

1. Химический состав никеля, % (ГОСТ 849—70)

Марка	Содержание никеля и кобальта в сумме, не менее	В том числе Со, не более (остальное примеси)	Марка	Содержание никеля и кобальта в сумме, не менее	В том числе Со, не более (остальное примеси)
Н-0	99,99	0,005	Н-2	99,80	0,15
Н-1у	99,93	0,1	Н-3	98,60	0,7
Н-1	99,93		Н-4	97,60	

2. Основные механические свойства никеля при 20° С

Состояние металла	Предел прочности, $\sigma_в$	Предел текучести, $\sigma_т$	Относительное удлинение δ, %	Твердость *НВ*
	кгс/мм²			
Чистый никель (в отожженном состоянии)	28—30	—	40—50	—
Никель:				
кованый	54—61	23—33	31—37	127—158
отожженный	50—55	19—24	42—44	90—110
Листы:				
холоднокатаные	63—77	59—74	1—2	130—160
отожженные	42—53	10—18	35—45	90—100
Проволока:				
холоднокатаная	67—77	59—74	—	—
отожженная	45—53	14—21	—	—

Никель обладает высокой коррозионной стойкостью в агрессивных средах. Никель чистоты 99,93 и выше имеет малое электрическое сопротивление, и поэтому его широко используют в электронной технике.

Никель сохраняет пластические свойства при низких температурах (табл. 3).

Небольшие добавки марганца, кремния, углерода, магния и других элементов, содержащихся в техническом (полуфабрикатном) никеле, вводят как раскислители и десульфураторы. Никель обладает высокой коррозионной стойкостью и повышенными механическими свойствами. Монель (табл. 4) по структуре относится к сплавам типа твердых растворов. Медь и небольшие присадки железа и кремния находятся в твердом растворе и самостоятельных фаз не образуют. Все сплавы типа монеля устойчивы против коррозии на воздухе, в морской и пресной воде, в растворах серной кислоты при концентрациях до 80%, а также в сухих газах при обычных температурах; хорошо противостоят действию водных растворов солей, щелочей, пара и органических кислот. Ползучесть и жаропрочность никель-медных сплавов при 250—500° С выше, чем ползучесть и жаропрочность медных сплавов. Плотность никеля, содержащего 98,5—99,5% Ni, составляет 8,7—8,84 г/см³. Температура плавления никеля в зависимости от степени его чистоты 1430—1455° С, а температура кипения при атмосферном давлении 2730—3080° С. Средняя удельная теплоемкость никеля в интервале температур 20—1630° С несколько меньше, чем у железа. Коэффициент теплопроводности технического никеля при 20° С составляет 0,1428 кал/(см·с·°С). С повышением температуры до 360° С (точки Кюри) теплопроводность никеля понижается, а при дальнейшем повышении температуры — возрастает. Коэффициент линейного расширения никеля тем больше, чем выше чистота металла, и для металла чистотой 99,1% при 20° равен $13{,}3 \cdot 10^{-6}$ 1/°С.

3. Механические свойства никеля при низких температурах

Температура испытания, ° С	Предел прочности $\sigma_в$, кгс/мм²	Относительное удлинение δ, %	Относительное сужение поперечного сечения ψ, %
+17	45	35	77
—196	63	46	89
—253	79	48	69

4. Химический состав некоторых марок никеля и медно-никелевых сплавов, % (ГОСТ492—73)

Сплав	Ni+Co	Cu	Si	Mn
Никель:				
кремнистый НК 0,2	99,4	—	0,15—0,25	0,05
марганцевый: НМц2,5	Остальное	0,5	0,3	2,3—3,3
НМц5	То же	0,5	0,3	4,60—5,40
Монель НМЖМц 28-2,5-1,5	»	29	0,05	1,2—1,8

В промышленности в основном используют сплавы на никелевой основе, приведенные в табл. 5. Они обладают, в зависимости от состава, высокой окалиностойкостью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью, большим электрическим сопротивлением и термоэлектродвижущей силой и т. д. Хром, а иногда кремний и алюминий, вводят в сплавы для улучшения их окалиностойкости. Для повышения жаропрочности применяют легирующие присадки: титан, алюминий, бор, ниобий, кальций, молибден, вольфрам и др. Большей частью эти элементы вводят в сплавы одновременно в определенных сочетаниях, и чем выше должна быть жаропрочность, тем более сложен химический состав сплава. Медь, хром, железо и кобальт образуют с никелем бинарный (двойной) твердый раствор в широком диапазоне концентраций и поэтому при обычных концентрациях в сплавах мало влияют на их свариваемость. При содержании в сплаве 20% Mo и выше образуется α-фаза. Сера, фосфор, магний, цирконий, бор и свинец нерастворимы в никеле и могут образовывать эвтектики, которые вызывают кристаллизационные трещины, если не применяют меры, предупреждающие их. Бор и цирконий в небольших количествах добавляют в некоторые сплавы для повышения их жаро-

Продолжение табл. 5

Марка	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Другие элементы	Примечание
					Жаростойкие			
ХН78Т (ЭИ435)	⩽0,12	⩽ 0,8	⩽ 0,7	19,0—22,0	Основа	—	0,15—0,35 Ti ⩽ 0,15 Al ⩽ 6,0 Fe	Детали газопроводных систем, сортовые детали, трубы
ХН70Ю (ЭИ625)	⩽ 0,10	⩽ 0,8	⩽ 0,3	26,0—29,0	Основа	—	2.8—3,5 Al < 1,0 Fe ⩽ 0,1 Ba ⩽ 0,03 Ce	Детали газопроводных систем
Х15Н60	⩽ 0,15	0,4—1,5	⩽ 1,5	15,0—18,0	55—61	—	⩽ 0,2 Al ⩽ 0,3 Ti	Проволока и лента для реостатов, печей
Х20Н80	0,15	0,4—1,5	⩽ 0,7	20,0—23,0	Основа	—	⩽ 0,3 Ti ⩽ 1,5 Fe ⩽ 0,2 Al	Листовые детали турбин, работающие при 800—950 °С
ХН60Ю (ЭИ559А)	⩽ 0,10	⩽ 0,80	⩽ 0,3	15,0—18,0	55—58	—	2.6—3,5 Al ⩽ 0,10 Ba ⩽ 0,03 Ce	Листовые детали турбин, работающие при умеренных напряжениях и температурах 1100 °С
ХН75МБТЮ (ЭИ602)	⩽ 0,10	⩽ 0,80	⩽ 0,4	19,0—22,0	Основа	—	0,35—0,75 Ti 0,35—0,75 Al 1,8—2,3 Mo 0,9—1,3 Nb ⩽ 3 Fe	Листовые детали турбин, работающие при 800 °С
ХН60ВТ (ЭИ868)	⩽ 0,10	⩽ 0,80	⩽ 0,5	23,5—26,5	Основа	—	13—16 W 0,3—0,7 Ti ⩽ 0,5 Al ⩽ 4 Fe	Листовые материалы для камер сгорания до 1100 °С
					Жаропрочные			
ХН67МВТЮ (ЭП202)	⩽ 0,08	⩽ 0,6	⩽ 0,5	17,0—20,0	Основа	4,0—5,0	2,2—2,8 Ti 1,0—1,5 Al 4—5 W ⩽ 4 Fe ⩽0,01 Ce ⩽ 0,01 B	Лопатки турбин, работающие при 1000 °С
ХН70ВМТЮ (ЭИ617)	⩽ 0,12	⩽ 0,6	⩽ 0,5	13,0—16,0	Основа	2—4	1,8—2,3 Ti 1,7—2,3 Al 5—7 W 0,1—0,5 V ⩽ 5 Fe ⩽0,02 Ce ⩽0,02 B	Лопатки турбин, работающие при 800 °С
ХН70ВМЮТ (ЭИ765)	0,10—0,15	⩽ 0,6	⩽ 0,5	14,0—16,0	Основа	3—5	1,0—1,4 Ti 1.7—2,2 Al 4—6 W ⩽ 3 Fe ⩽ 0,01 B	Лопатки крепежные детали турбин, работающие при 750 °С
ХН70МВТЮБ (ЭИ598)	⩽ 0,12	⩽ 0,6	⩽ 0,5	16,0—19,0	Основа	4,0—6,0	1,9—2,8 Ti 2,0—3,5 W 1,0—1,7 Al 0,5—1,3 Nb ⩽ 0,02 Ce ⩽ 0,01 B	Лопатки турбин, работающие при 700 °С
ХН80ТБЮ (ЭИ607)	⩽ 0,08	⩽ 0,8	⩽ 1,0	15,0—18,0	Основа	—	1,8—2,3 Ti 0,5—1,0 Al 1,0—1,5 Nb ⩽ 3,0 Fe	Лопатки, крепежные детали турбин, работающие при 850 °С
ХН75ВМЮ (ЭИ827)	⩽ 0,12	⩽ 0,4	⩽ 0,4	9,0—11,0	Основа	5,0—6,5	4,5—5,5 W 4,0—4,6 Al ⩽ 5,0 Fe 0,01—0,02 B ⩽0,01 Ce	Лопатки турбин, работающие при 800 °С
ХН77ТЮР (ЭИ437Б)	⩽ 0,7	⩽ 0,6	⩽ 0,4	19,0—22,0	Основа	—	2,4—2,8 Ti 0,6—1,0 Al ⩽ 4,0 Fe ⩽0,02 Ce	Лопатки и диски турбин, работающие при 800 °С
					Коррозионно-стойкие			
Н70МФ (Н70М27Ф, ЭП408)	⩽ 0,05	⩽ 0,2	⩽ 0,5	⩽ 0,3	Основа	25—29	⩽ 4 Fe 1,4—1,7 V	Сплав устойчив к межкристаллитной коррозии в агрессивных средах

прочности. Однако при этом ухудшается их свариваемость. Магний в небольших количествах препятствует влиянию серы на пластичность металла. В относительно небольших количествах марганец, молибден, кремний, углерод, алюминий и титан либо благотворно влияют, либо не влияют на свариваемость. Для предупреждения кристаллизационных трещин необходимо контролировать содержание этих элементов. Марганец, вводимый в количестве до 3% в медно-никелевые и хромоникелевые сплавы, повышает их стойкость к образованию кристаллизационных трещин. Титан связывает газы, уменьшает вероятность образования в швах пор.

Для повышения сопротивления образованию кристаллизационных трещин в околошовной зоне в сварных конструкциях рекомендуется использовать стали с минимальным количеством вредных примесей (после электрошлакового, плазменно-дугового или электронно-лучевого переплава).

6. Механические свойства некоторых никелевых сплавов

Марка	Термическая обработка	$\sigma_в$, кгс/мм²	δ, %	ψ, %	$\sigma_т$, кгс/мм²	$a_н$, кгс/см²
ХН78Т (ЭИ435)	Закалка с 960—1020 °С, охлаждение в воде или на воздухе	70	27,5	30	—	—
ХН70Ю (ЭИ652)	Закалка с 1100 °С, охлаждение на воздухе	75	—	30	—	—
ХН60Ю (ЭИ559А)	В состоянии поставки	65	—	30	—	—
ХН70 (ЭИ442)		70	20	—	—	—
ХН75МБТЮ (ЭИ602)	Закалка с 1050—1080 °С, охлаждение на воздухе	75	40	40	—	—
Х15Н60	—	60	25	45	—	—
ХН77ТЮР (ЭИ437Б)	Закалка с 1080 °С, охлаждение на воздухе; старение при 700 °С, 16 ч	100	20	21	65	5
ХН70ВМТЮ (ЭИ617)	Закалка с 1190 °С, охлаждение на воздухе; старение при 800 °С, 16 ч	114	14,5	15,0	75	1,5—3,0
ХН80ТБЮ (ЭИ607)	Закалка с 1100°С в воду; ступенчатое старение	95	18	22	65	7
ХН70ВМЮТ (ЭИ765)	Закалка с 1150 °С, охлаждение в масле; старение при 800 °С, 2 ч	105	20	25	60	8
ХН67МВТЮ (ЭП202)	Закалка с 1200 °С, охлаждение на воздухе; старение при 850 °С, 15 ч	100	20—30	20—30	55—75	6—12

Никелевые сплавы условно можно разделить на три группы. Жаростойкие (нихромы) обладают повышенной стойкостью к коррозии в газовых средах при повышенных температурах. Эти сплавы построены на базе α-твердого раствора с добавками легирующих элементов (W, Mo, Al, Ti), которые повышают термическую стойкость твердого раствора и сравнительно мало упрочняют его за счет дисперсионного твердения. Титан и алюминий вводят в таких количествах, что они незначительно влияют на упрочнение сплава при старении. Например, сплав ХН78Т относится к нихромам типа 80-20 с небольшими присадками титана и алюминия. При 20° С сплав имеет несколько повышенную прочность (табл. 6) по сравнению с прочностью аустенитных сталей типа 25-20 и 18-8 и достаточно высокую пластичность. При высоких температурах сплав ХН78Т имеет удовлетворительные механические свойства. Однако стойкость до разрушения при высоких температурах зависит от одновременного действия газовой коррозии и напряжений. При небольших напряжениях сплав хорошо сопротивляется окислению до 1000° С. При более высоких температурах и повышенных нагрузках происходит межкристаллитное окисление. Сплав ХН78Т хорошо сваривается различными видами сварки и имеет высокие механические свойства в сварных соединениях.

Никелехромистый сплав ХН75МБТЮ имеет повышенную по сравнению со сплавом ХН78Т жаропрочность. При 20° С сплав имеет повышенную прочность и высокую пластичность, хорошо штампуется в холодном состоянии и сваривается контактной и дуговой сваркой. В одинаковых условиях применения в камерах сгорания сплав ХН75МБТЮ обнаружил лучшую стойкость против растрескивания и коробления, чем сплав ХН78Т.

Наличие в сплавах типа ХН60ВТ вольфрама и молибдена снижает окалиностойкость сплавов, но не так резко, как хромоникелевых сплавов на железной основе. На основе сплавов типа 60-25 разработаны два сплава, содержащие вольфрам. Сплавы относятся к гомогенным, обладают хорошими технологическими свойствами и достаточно высокой жаростойкостью. Они хорошо штампуются и свариваются; применяют их для изделий, работающих при высоких температурах и небольших нагрузках.

Жаропрочные сплавы (табл. 6) имеют повышенные прочностные свойства при высоких температурах по сравнению со сплавами на железной и даже кобальтовой основе. Их упрочнение достигается вследствие образования и выделения при повышенных температурах интерметаллидных фаз типа химических соединений. Упрочнение сплавов, содержащих титан или титан и алюминий с добавками тугоплавких металлов (W, Mo, Nb) или без них, имеет одну и ту же природу и в основном протекает в результате образования интерметаллидных фаз (γ') — фаз типа Ni_3 (Ti, Al) и $(Ni, Fe)_2$. Например, сплав ХН70ВМЮТ относится к дисперсионно-твердеющим: применяют его в термически обработанном состоянии после закалки с 1150° С в масле и старения при 800° С в течение 2 ч. В результате старения твердость сплава составляет *НВ* 277—321. Он имеет высокую релаксационную стойкость, что обусловлено большим содержанием таких легирующих элементов, как вольфрам, молибден, титан, которые не только вызывают значительное упрочнение сплава в процессе дисперсионного твердения, но и способствуют росту сопротивления ползучести. Сплав ХН77ТЮР — дисперсионно-твердеющий. После закалки для получения γ-твердого раствора сплав имеет невысокие прочностные свойства и высокие пластичность и ударную вязкость. Предел прочности и жаропрочность повышаются в результате старения при 700—750° С. Введение бора увеличивает длительную прочность.

Сплавы типа Н70М27 и др. содержат повышенное количество молибдена. Вследствие высокой коррозионной стойкости в серной, соляной, фосфорной кислотах и других средах нашли широкое применение при изготовлении химической аппаратуры. Физические свойства некоторых никелевых сплавов приведены в табл. 7.

7. Физические свойства некоторых никелевых сплавов

Марка	Плотность γ, г/см³	Коэффициент теплопроводности λ, кал/(см·с·°С)	Коэффициент линейного расширения α · 10⁶, 1/°С	Удельное электрическое сопротивление ρ · 10⁶, Ом/(мм² · м)	Модуль продольной упругости $E \cdot 10^3$, кгс/мм²
ХН78Т (ЭИ435)	8,35	0,035	12,8	—	19,5
ХН70 (ЭИ442)	8,3	—	—	1,4	—
ХН75МБТЮ (ЭИ602)	8,3	0,032	12,4	—	19,0
ХН78Т (ЭИ435)	8,35	—	—	1,11	—
ХН77ТЮР (ЭИ437Б)	8,2	0,033	12,7	—	19,8
ХН70ВМТЮ (ЭИ617)	8,4	0,023	12,0	—	20,0
ХН80ТБЮ (ЭИ607)	8,3	0,032	13,1	1,17	22,0
ХН70ВМЮТ (ЭИ765)	8,6	0,022	12,1	1,33	22,6

Для сварки никеля и никелевых сплавов применяют следующие способы сварки: газовую, ручную дуговую, под флюсом, вольфрамовым электродом в среде инертных газов, электронно-лучевую и диффузионную. Выбор способа и техно-

логии сварки зависит от конкретных условий работы сварной конструкции, т. е. сводится к обеспечению наиболее важной для данных условий характеристики свойств сварного соединения. Поэтому даже для одного и того же сплава или группы сплавов технология сварки может быть различной в зависимости от условий эксплуатации сварного изделия.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА СВАРКИ

Для получения сварных швов, удовлетворяющих разнообразным требованиям, приходится легировать их элементами, не содержащимися в основном металле, и одновременно препятствовать обогащению шва вредными примесями. В зависимости от метода сварки никеля могут быть применены различные способы легирования металла шва. Наиболее надежным способом легирования является применение электродной проволоки определенного состава в сочетании с пассивным нелегирующим электродным покрытием, с флюсом или использованием сварки в среде инертных газов. При этом должны быть обеспечены условия для полного усвоения сварочной ванной легирующих элементов, содержащихся в основном и присадочном металлах. При ручной сварке легирование шва может осуществляться через электродное покрытие, в состав которого вводятся порошки металлов или ферросплавов. При сварке под флюсами легирование металла шва является следствием физико-химических процессов между окислами флюса и никелем.

На свойства металла сварных швов влияет содержание в нем серы и свинца. Сера обладает большим химическим сродством к никелю. Особенно это заметно при температурах выше 400° С, когда в течение короткого времени образуется сульфид никеля, образующий с никелем низкоплавкую эвтектику при 645° С. Эвтектика содержит 21,5% S. Она располагается вдоль границ зерен металла и охрупчивает его. Пластичность никеля исчезает полностью. Особенно чувствителен к сере чистый никель. Глубина и скорость проникновения серы в никель зависят от температуры. При температуре до 400° С заметного проникновения серы в никель не наблюдается. Сульфид никеля может образоваться, если с никелем соприкасаются материалы, которые содержат даже небольшие количества серы, например горючие материалы, масло, жиры, краски и т. д.

Повышенные требования при сварке никеля и его сплавов предъявляются к чистоте поверхности металла. При долгом хранении на никеле и медно-никелевых сплавах образуется налет, содержащий серу. Этот налет не снимается при обезжиривании; требуется механическая зачистка перед сваркой на участке длиной 20—30 мм от места разделки и последующее обезжиривание ацетоном, уайт-спиритом или чистым бензином. Свинец также вызывает охрупчивание металла швов.

Для предупреждения образования в швах пор необходимо предупреждать контакт расплавленного металла с атмосферным воздухом. Никель и никелевые сплавы в расплавленном состоянии могут растворять большое количество газов (азота, водорода, кислорода), которые, выделяясь при кристаллизации и охлаждении металла шва, могут приводить к образованию в них пор. Основной причиной пористости швов при аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом сплава НП2 является азот и окись углерода; меньшее влияние оказывает кислород. Указывается также на связь пор с водородом. Легирование шва титаном, хромом и ванадием уменьшает вероятность образования пор, а церием, марганцем, углеродом, ниобием, кремнием и железом — увеличивает. Поэтому при сварке необходимо защищать расплавленный металл и предохранять зону сварки от попадания воздуха, влаги и других загрязнений. Для этого следует применять прокалку электродов, поддув газа, подкладки и подушки для защиты обратной стороны шва, а также очищать поверхности кромок и присадочной проволоки. При аргонодуговой сварке вероятность образования пор в швах уменьшается с повышением качества защиты зоны сварки и расплавленного металла от воздуха.

При сварке никеля и сплавов никеля с медью основной металл в зоне термического влияния не претерпевает структурных изменений, не закаливается и не имеет дефектов, вызывающих необходимость предварительного подогрева или последующей термической обработки.

В сплавах никеля с молибденом и никеля с молибденом и хромом в зоне сплавления может возникнуть коррозия, для предотвращения которой сварное соединение подвергают последующей термической обработке, заключающейся в нагреве до температуры отжига и быстром охлаждении при закалке. Такая же термическая обработка нужна для сплавов, содержащих кремний. Сваривать эти сплавы газовой сваркой не рекомендуется ввиду того, что металл продолжительное время подвергается действию высокой температуры, что может привести к понижению коррозионной стойкости. Следует также опасаться науглероживания металла шва, снижающего стойкость шва против коррозии и жаропрочность.

Металл в сварочной ванне при сварке никеля и его сплавов более вязок, чем при сварке стали, и поэтому проплавляется на меньшую глубину. В таком случае требуется более широкая разделка кромок и увеличение их притупления. При сварке кислотостойкой аппаратуры следует избегать стыковых соединений с отбортовкой кромок, так как образующиеся в этом случае с обратной стороны шва «карманы» могут вызвать появление щелевой коррозии при эксплуатации изделий.

Особое внимание необходимо обращать также на качество сборки узлов. Сборка узлов с большими зазорами ведет к увеличению времени сварки, а значит его перегреву, что может вызывать рост зерна, склонность к трещинообразованию сварочного шва и околошовной зоны, снижению коррозионной стойкости и т. д. При сварке коррозионно-стойких сплавов увеличение числа проходов снижает коррозионную стойкость сварных соединений и может привести к образованию трещин в местах пересечения швов.

ГОСТы или технические условия, по которым выпускают электродные проволоки, используемые при сварке никеля и никелевых сплавов, указаны в табл. 8.

8. ГОСТы или технические условия на электродную проволоку из никеля и никелевых сплавов

Марка электродной проволоки	ГОСТ или технические условия
НП1, НП2, НП3, НП4, НКО, 2	ГОСТ 2179—75
ХН78Т (ЭИ435), ХН70Ю, ХН67МВТЮ	ГОСТ 5632—72
ХН65МВ, 0Х15Н55М16В, ЭП567	ГОСТ 5632—72
ХН77ТЮР (ЭИ437Б)	ГОСТ 5632—72
Х15Н60, Х20Н80	ГОСТ 10994—74
Св-08Н50, Св-06Х15Н60М15	ГОСТ 2246—70

Газовая сварка

Газовую сварку можно использовать для никеля и медно-никелевых сплавов. Для сварки других, особенно кислотостойких сплавов, ее применяют ограниченно. При кислородно-ацетиленовой сварке никеля и медно-никелевых сплавов необходимо поддерживать нормальное пламя, так как избыток кислорода вызывает окисление расплавленного металла, пористость, хрупкость. Избыток ацетилена также может явиться причиной появления пористости и хрупкости металла шва. При сварке сплавов, содержащих хром, пламя должно быть более восстановительным, но не настолько, чтобы науглероживать наплавленный металл, насыщать его водородом, закисью углерода и другими газами.

При сварке никеля мощность пламени соответствует удельному расходу ацетилена 140—200 л/ч на 1 мм толщины свариваемого металла. Главным дефектом при газовой сварке являются поры в результате насыщения металла шва водородом или повышения содержания в нем углерода с последующим образованием окиси углерода. Качество сварки зависит от состава флюсов и раскислителей, конструкции соединения, а также от опыта сварщика. Для сварки никеля рекомендуется применять присадочную проволоку того же состава, что и состав основ-

ного металла. Хорошие результаты обеспечивает проволока, легированная марганцем, магнием, кремнием и титаном. При этом марганец служит раскислителем и связывает серу, цинк раскисляет никель, кремний придает металлу лучшую жидкотекучесть, а магний связывает остатки серы. Содержание указанных элементов в проволоке и наплавленном металле не должно быть слишком высоким (например, Mn до 2%, Si до 0,8%, Mg до 0,05% и Ti до 0,1%). Проволока должна иметь чистую поверхность, без следов смазки, масла и грязи. Диаметр присадочной проволоки рекомендуется выбирать равным половине толщины свариваемого металла, но не более 6 мм.

В отличие от газовой сварки стали при сварке никеля необходимо избегать перемешивания ванны, которое ведет к выгоранию раскислителей и загрязнению металла шва. Качество шва можно определить по цвету. Хороший шов имеет матово-коричневую или серо-желтую окраску. Шов, сваренный с перегревом, блестящий, сине-черного цвета. Во избежание пористости сварного соединения присадочная проволока и ядро пламени горелки не должны касаться ванны.

Для сварки никеля и его сплавов применимы левый и правый методы сварки. При левом методе сварки сварочная ванна более интенсивно взаимодействует с кислородом окружающего воздуха. Этот метод можно применять при сварке изделий из металла толщиной 1—2 мм. При правом методе сварки пламя направлено на расплавленный металл, в результате чего замедляется охлаждение сварочной ванны, уменьшается окисление расплавленного металла и предотвращается пористость и образование трещин. Пламя горелки направлено к поверхности свариваемых листов под углом 45°. Проволоку можно держать спокойно в ванне, но лучше, чтобы ее конец находился в пламени. При сварке рекомендуется производить горелкой легкие колебательные движения.

На качество сварного соединения никеля влияет чистота ацетилена, который может являться источником загрязнения шва серой. Поэтому при сварке необходимо применять хорошо очищенный, а лучше всего растворенный ацетилен. Сварку следует выполнять без задержек и возврата на сваренный участок во избежание перегрева околошовной зоны, сопровождающегося образованием трещин. Следует также избегать применения многослойной газовой сварки.

При сварке тонких (толщиной до 1 мм) листов для уменьшения коробления следует отгибать кромки, повышая тем самым жесткость листов. Сварку производят без присадочной проволоки. Листы толщиной до 4 мм сваривают встык без скоса кромок. Толстые листы сваривают с V- и X-образной разделкой. Вследствие значительной усадки сварку стыковых швов производят, отступив на 100—200 мм от края, так как может произойти наползание кромок друг на друга. По той же причине сборку под сварку осуществляют с большим зазором. Металл швов в местах дефектов следует вырубать и заваривать вновь. В тех случаях, когда конструкция должна иметь гладкую поверхность, после газовой или дуговой сварки применяют проковку или прокатку шва. При этом прочность швов повышается за счет измельчения структуры. Иногда после проковки производят отжиг. После такой обработки прочность швов равна прочности основного металла. При сварке необходимо обращать внимание на то, чтобы в изделии возникали минимальные сварочные напряжения для предотвращения коррозии под напряжением.

Чистый никель можно сваривать без флюса, сплавы никеля — с флюсом, в состав которых не должен входить бор (бор образует легкоплавкие соединения, которые могут вызвать образование трещин в наплавленном металле, особенно при сварке сплавов, содержащих хром). При сварке никеля и его сплавов флюсы применяют главным образом для облегчения растворения окислов, защиты сварочной ванны от действия окружающего воздуха и улучшения жидкотекучести металла. Флюсы в виде пасты наносят на присадочный пруток и свариваемый металл. При изготовлении пасты сухую смесь замешивают на воде или спирте. Составы наиболее распространенных флюсов приведены в табл. 9.

Сварка нихрома затрудняется образованием на поверхности ванны тугоплавкой пленки окиси хрома, которую удаляют механическим путем. Сварку производят с максимальной скоростью и без перерывов. Повторная и многослойная сварка вызывает трещины, значительный рост зерна и межкристаллитную коррозию в шве. Пламя должно быть слегка восстановительным, а его мощность соответствовать удельному расходу ацетилена 50—70 л/ч на 1 мм толщины свариваемого металла. В качестве присадочного прутка применяют проволоку того же состава, что и состав свариваемого металла. При сварке применяют флюс-пасту № 6. После отжига предел прочности сварного соединения из нихрома, выполненного ацетилено-кислородной сваркой, равен 35—45 кгс/мм².

9. Состав флюсов для газовой сварки никеля и никелевых сплавов, %

Компоненты	Номер состава					
	1	2	3	4	5	6
Бура прокаленная	52	30	25	—	50	40
Кислота борная	15	50	75	—	50	50
Магний хлористый	8	—	—	—	—	—
Нитрий хлористый	25	10	—	—	—	—
Кальций фтористый	—	—	—	15	—	10
Гашеная известь	—	—	—	17	—	—
Борный ангидрит	—	—	—	23	—	—
Натриевое стекло	—	—	—	45	—	—
Барий углекислый	—	10	—	—	—	—

Сварные соединения из никеля, выполненные газовой сваркой, имеют предел прочности, равный 26—32 кгс/мм², и угол загиба 90—120° для соединения толщиной до 10 мм, что значительно ниже соответствующих показателей для основного металла. Механические свойства швов при газовой сварке приведены в табл. 13.

Ручная дуговая сварка

Ручную дуговую сварку применяют в основном для листов толщиной свыше 1,5 мм и осуществляют электродами с качественным, чаще всего основным, покрытием на постоянном токе обратной полярности. Для предупреждения перегрева электрода и получения возможно меньших напряжений в сварном соединении при сварке используют ток, пониженный по сравнению с током при сварке стали (табл. 10).

10. Ориентировочные режимы ручной сварки никелевых сплавов качественными электродами

Толщина металла	Диаметр электрода	Длина электрода	Ток, А
мм			
До 2	2	150—200	30—50
2—2,5	2—3	200—225	40—80
2,5—3,0	3	225—250	70—100
3—5	3—4	250—300	80—140
5—8	4	300	90—100
8—12	4—5	300—400	100—165

Для уменьшения угара стабилизирующих и раскислительных элементов, содержащихся в электродной проволоке, необходимо поддерживать короткую дугу. Скорость сварки никелевых сплавов примерно на 15% меньше скорости сварки сталей. Сварку по возможности следует вести в нижнем положении. При сварке во всех пространственных положениях электрод должен быть перпендикулярен к шву в поперечном направлении и наклонен примерно на 20° в сторону направления сварки, за исключением сварки на подъем. Поперечные колебания электрода не должны превышать трех диаметров электрода. Вертикальные швы на металле толщиной до 2,5 мм лучше сваривать на спуск.

Зазор между свариваемыми кромками должен быть 2—3 мм. Листы следует жестко закреплять. Рекомендуется вести сварку по возможности за один проход. При больших толщинах, где многопроходная сварка неизбежна, необходима

хорошая очистка поверхности промежуточных слоев от окислов и шлака. Длинные швы лучше сваривать участками, оставляя небольшие разрывы, зачищаемые после зачистки от шлака. Шов делают с усилением; усиленный участок затем сошлифовывают. Проковка шва улучшает его качество, однако, если металл содержит сульфиды, она не должна быть слишком сильной во избежание трещин. При сварке никеля состав металлического стержня электродов идентичен составу основного металла. Применяя соответствующие электроды и режимы сварки, можно получить швы с коррозионной стойкостью и другими свойствами не ниже, чем аналогичные свойства основного металла. Большое значение имеет обработка поверхности швов, так как подрезы, наплывы и плохое формирование шва могут быть причиной возникновения коррозии, трещин и других дефектов. Наилучшие результаты обеспечивает полирование.

Для сварки никеля можно использовать электроды Н-10, Н-37 и «Прогресс-50» (табл. 11). В качестве электродного прутка используют никелевую проволоку НП1 по ГОСТ 492—73.

11. Состав покрытия некоторых электродов для сварки никеля и никелевых сплавов, %

Компоненты	Электрод					
	Н-10	Н-37	«Прогресс-50»	ИМЕТ-7	ВИ-2-6	ИМЕТ-10
Мрамор	40,0	40	—	6	42	10
Плавиковый шпат	48,5	18	20	—	44	22
Кварцевый песок	3,0	—	—	—	—	—
Сода кальцинированная	2,0	—	—	—	—	—
Ферромарганец МН-0	3,5	—	—	—	14	3
Ферросилицит СМ-75	3,0	4 (45 Cu)	—	—	—	—
Ферротитан Ти-1	—	11	—	—	—	—
Марганец металлический Мр-1	—	10	8	—	—	—
Порошок алюминиевый ПАП-1	—	7	6 (3 ПА)	—	—	—
Лигатура	—	10	—	—	—	—
Двуокись титана	—	—	51	25,0	—	20
Хлористый натрий	—	—	6	—	—	—
Титановый порошок ИМП-1А	—	—	8	—	—	—
Бентонит	—	—	1	—	—	—
Фтористый кальций (чистый)	—	—	—	35,0	—	—
Хромоникелевая лигатура	—	—	—	6,0	—	—
Окись алюминия	—	—	—	15,0	—	5
Молибден	—	—	—	3,0	—	—
Хром металлический	—	—	—	—	—	30
Ферровольфрам	—	—	—	—	—	10
Алюминат натрия (% к массе сухих компонеитов)	—	—	—	10	—	—
Жидкое стекло (% к массе сухих компонентов)	30,0	28—30	—	—	—	—

Электроды Н-10 изготовляют методом окунания, просушивают на воздухе 12—16 ч и прокаливают при 250—300° С в течение 3—4 ч. Недостатком электродов Н-10 является пористость сварных швов, которая может быть несколько снижена путем предварительного нагрева свариваемого изделия до 250—300° С. Поэтому указанные электроды используют лишь при выполнении неответственных работ.

Электроды Н-37 изготовляют так же, как и электроды Н-10. Основным недостатком электродов Н-37 является непостоянство качества сварных швов, зависящее от качества электродов и режимов сварки. Во многих случаях швы получаются неплотными, пористыми, особенно при сварке никеля Н-1 и Н-2.

Электроды «Прогресс-50», применяемые для сварки никеля, отличаются тем, что имеют покрытие кислого типа, позволяющее получать высококачественные сварные соединения при сварке не только никеля Н-1, но и никеля Н-2. Указанные электроды обеспечивают получение металла швов, стойкого против образования пор и трещин, с высокими прочностными и коррозионными свойствами. Указанные электроды могут быть изготовлены методом опрессовки или окунания. Компоненты покрытия готовят в обычном для изготовления электродов порядке.

В некоторых случаях для сварки никеля и монеля можно использовать электроды с покрытием УОНИ-13/45. Однако в этом случае наблюдается повышенная склонность металла швов к пористости. Согласно ГОСТ 10052—75 для сварки некоторых никелевых сплавов предусмотрены электроды типов Э-08Н60Г7М7Т, Э-08Х25Н60М10Г2 и Э-02Х20Н60М15В3. Для сварки никелехромистых сплавов ХН78Т (ЭИ435) и ХН77ТЮР (ЭИ437Б) используют электроды ЦТ-28, а сплавов ХН80ТБЮ (ЭИ607), ХН80ТБЮА (ЭИ607А), ХН70ВМТЮ (ЭИ617) и ХН75МВЮ (ЭИ827) — электроды ИМЕТ-4, ИМЕТ-7, ИМЕТ-4П, ВИ-2-6. После сварки для снятия остаточных сварочных напряжений рекомендуется соответствующая термическая обработка. Механические свойства швов приведены в табл. 13 и 14.

Сварка под флюсом и электрошлаковая сварка

Требования к подготовке поверхности листов и электродной проволоки для сварки под флюсом такие же, как и при ручной дуговой сварке. При сварке никеля и никелевых сплавов состав электродной проволоки приближается к составу основного металла (табл. 12).

12. Материалы для сварки под флюсом никелевых сплавов

Сплав	Проволока	Флюс
Н-1, Н-2, НП1, НП2	Н-1, НП1, НП2, НМц2,5	ЖН-1
ХН77ТЮР (ЭИ437Б)	ХН77ТЮ	АНФ-5, АНФ-22
ХН65МВ (0Х15Н65М16В, ЭП567)	ХН65МВ	АНФ-5, АНФ-23
ХН67МВТЮ (ЭП202)	ЭП356	АНФ-23

Сварку никеля и никелевых сплавов под флюсом производят на постоянном токе обратной полярности на обычных стандартных автоматах и полуавтоматах. Несколько лучшие результаты получаются при использовании автоматов с зависимой от напряжения дуги подачей электродной проволоки. Ввиду опасности и нежелательного перегрева основного металла сварку стремятся выполнять швами небольшого сечения. Это предопределяет применение электродных проволок небольшого диаметра (2—3 мм). Из-за высокого электрического сопротивления высоконикелевых электродных проволок и повышенного коэффициента их расплавления следует уменьшать вылет электрода в 1,5—2 раза по сравнению с вылетом электрода при сварке стальной проволокой. Механические свойства швов при сварке под флюсом и электрошлаковой сварке приведены в табл. 13—16.

Аргонодуговая сварка

Аргонодуговая сварка является одним из распространенных способов соединения никеля и его сплавов, позволяющих получать в ряде случаев наиболее высокое качество, особенно на тонколистовом металле. Аргонодуговую сварку применяют и в тех случаях, когда остающийся в металле шва шлак и флюс снижают его эксплуатационные свойства. При аргонодуговой сварке расплавленный металл в сварочной ванне надежно предохраняется от окисления защитной струей аргона, в результате чего обеспечивается постоянное и высокое качество сварных соединений.

Одним из средств предотвращения пористости при аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом никеля, монелей и некоторых жаростойких сплавов

13. Механические свойства металла шва и сварных соединений

Сплав	Толщина, мм	Сварочная проволока	Сварка	Испытуемый образец	$\sigma_в$	$\sigma_т$	$a_н$, кгс · м/см²	δ, %
					кгс/мм²			
Нимоник 80А	0,9 1,6	Нимоник 80А	Аргонодуговая	Сварное соединение	82,2 85,5	— —	— —	27,0 9,0
Н70МФ (Н70М27Ф, ЭП496)	3,0 5,0 10,0	—			78,8 79,8 101,0	— — —	9,3 7,2 6,2	— — —
ХН65МВ (0Х15Н65М16В ЭП567)	3,0 5,0 10,0	—			78,3 77,5 84,0	— — —	— 20,0 9,6	— — —
ХН78Т (ЭИ435)	12,5	ХН78Т (ЭИ435)	Электрошлаковая, пластинчатым электродом, флюс: АНФ-1 АНФ-7	Металл шва	63,8	28,8	40,5	17,4
ХН77ТЮР (ЭИ437Б)	10,0	ХН77ТЮР (ЭИ437Б)		Металл шва Сварное соединение	76,2 80,0	58,7 —	— —	18,0 17,4
Н-1	—	Н-1	Газовая с Х-образной разделкой	Сварное соединение	54,6	42,7	—	17,1
Н-1	—	Н-1	Газовая с V-образной разделкой		53,1	41,2	—	15,0
Н70МФ (Н70М27Ф, ЭП496)	3,0	—	Газовая		68,9	—	—	—
ХН65МВ, (0Х15Н65М16В, ЭП567)	3,0	—			57,0	—	—	—
Типа Х20Н80	—	—	Ручная дуговая электродами: ЦЧМ-2 ИМЕТ-4 ИМЕТ-4П		39,2 62,5 74,2	— — —	17,4 15,0 2,0	40,5 22,5 6,9
ХН70МФ (Н70М27Ф, ЭП496)	3,0 10,0	—			82,6 88,5	— —	7,6 5,2	— —
ХН65МВ (0Х15Н65М16В, ЭП567)	3,0 10,0	—	Ручная дуговая		75,1 —	— —	— 7,4	— —

14. Механические свойства сварных соединений

Сварка ручная	Никель-молибденовые сплавы			Никель-хроммолибденовые сплавы		
	$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ, %	$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ, %
	кгс/мм²			кгс/мм²		
Дуговая . . .	55—78	33—41	7—45	62—80	37—43	9,1—30,5
Аргонодуговая	70—78	30—42	16—45	62—78	35—41	10—30

15. Длительная прочность сварных соединений некоторых никелевых сплавов

Сплав	Сварка	Толщина металла, мм	Сварочная проволока	Условия испытания		Время до разрушения, ч			δ, %
				Температура, °С	Постоянное напряжение, кгс/мм²	Металл шва	Сварное соединение	Основной металл	
ХН77ТЮР (ЭИ437Б)	Под флюсом АНФ-5	12	ХН77ТЮ (ЭИ437А)	55	75 67,5	— —	4 170	55 —	15,3 4,3
				700	44 40	23,0 —	30 46—79	51 —	1,35 0,13—4,32
				750	30 27	33,0 —	41 55—90	141 —	1,3 0,6—2,75
ХН77ТЮР (ЭИ437Б)	Электрошлаковая, флюс АНФ-7	100	Пластинчатая ХН77ТЮР (ЭИ437Б)	700	44 40	40—67 50	24—42 116	— —	— —
Нимоник 80А	Аргонодуговая вольфрамовым электродом	1,5	—	750	21	—	125—161	84—183	0,8—1,3

Примечание. При электрошлаковой сварке сварное соединение термически обработано: 1080°С, 8 ч, воздух + 700°С, 16 ч, воздух; при сварке сплава нимоник 80А: 1050°С, 15 мин, воздух + 700°С, 16 ч, воздух.

16. Механические свойства металла шва и сварного соединения на сплаве ХН77ТЮР при электрошлаковой сварке (флюс АНФ-7)

Образцы	Температура испытания, °С	$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ, %	$a_н$, кгс · м/см²
		кгс/мм²			
Металл шва	20 700	68 50	37 25	41 46	22 —
Металл шва после закалки и старения	20 700	76 67	58 51	18 18	6,6 —
Сварное соединение	20	67	—	41	—
Сварное соединение после закалки и старения	20	80	—	17	—

является добавка к аргону до 20% Н. Никель растворяет большое количество водорода как в жидком, так и в твердом состоянии. При кристаллизации никель может растворить водорода в 2 раза больше, чем аустенитная сталь, и в 3 раза больше, чем низкоуглеродистая сталь. Положительное действие водорода в зоне дуги объясняется тем, что кислород воздуха, находящийся в атмосфере дуги, в первую очередь окисляется водородом и поэтому возможность образования закиси никеля в расплавленном металле будет сведена к минимуму; в результате устраняются и причины образования пор. Количество водорода в защитном газе необходимо строго контролировать, так как при чрезмерной его концентрации (более 20%) поры могут появиться уже вследствие избытка водорода. Этот способ сварки применим для получения однопроходных швов и корневых швов в многопроходных швах.

Аргонодуговая сварка может осуществляться неплавящимся вольфрамовым электродом без присадочного или с присадочным металлом, а для металла повышенной толщины также плавящимся электродом. С целью предупреждения пор в металле швов желательно применять при сварке проволоку, легированную титаном (до 3%). При использовании вольфрамового электрода аргонодуговая сварка никеля и его сплавов производится на постоянном токе прямой полярности (минус на электроде). При автоматической сварке можно использовать и переменный ток. В качестве неплавящегося электрода следует использовать вольфрамовые прутки ВЛ-10 и ЭВТ-15. Чтобы избежать включений вольфрама в металле шва при зажигании дуги, возбуждение дуги следует производить на технологической подкладке. Для облегчения зажигания дуги в сварочную цепь рекомендуется включать осциллятор. Заканчивая процесс сварки, следует уменьшать сварочный ток для предотвращения образования трещин в кратере. При сварке плавящимся электродом используют постоянный ток обратной полярности. Для начала и окончания сварки шва часто применяют заходные и выходные пластины

17. Ориентировочные режимы сварки стыковых соединений никеля

Разделка кромок	Толщина металла, мм	Число проходов	Диаметр, мм: вольфрамового электрода	Диаметр, мм: присадочной проволоки	Ток, А	Расход аргона в горелку, л/мин
Без разделки	2	1	1,5—2,0	1,0—1,5	70—90	8—10
	4	2	2,0—2,5	1,5—2,0	80—100	
V-образная	4	2	2,0—2,5	2,0—2,5	80—100	8—10
	6	3		2,5—3,0		10—12
	10	4	2,5—3,0	3,0	100—120	10—12
X-образная	6	2	2,0—2,5	2,5—3,0	90—120	10—12
	8	4	2,5—3,0			
	10				100—120	

Примечание. Расход аргона на защиту корня шва 2—3 л/мин.

Сварку никеля и никелевых сплавов вольфрамовым электродом рекомендуется производить левым способом на плотно поджатой медной подкладке или с защитой корня шва аргоном. Швы желательно накладывать с минимальными поперечными колебаниями электрода и максимально возможной скоростью. Допускается также сварка широкими швами. Наклон горелки к оси шва должен

быть 45—60°, а вылет вольфрамового электрода 12—15 мм. Присадочный металл подают под углом 20—30° к оси шва. Длина дуги должна быть минимальной. При ручной сварке никеля минимальная пористость в швах достигается, если последние образованы по крайней мере на 50% за счет присадочного металла. При многопроходной сварке последующие швы необходимо накладывать после полного охлаждения металла, зачистки от шлака и обезжиривания предыдущих швов. При сварке никеля допускается охлаждение водяным душем. Швы, обращенные к агрессивной среде, выполняются в последнюю очередь. Ориентировочные режимы сварки никеля приведены в табл. 17, а никелевых сплавов — в табл. 18 и 19.

18. Ориентировочные режимы ручной аргонодуговой сварки стыковых соединений сплавов Н70МФ и ХН65МВ

Толщина металла, мм	Разделка кромок	Число проходов	Диаметр, мм: вольфрамового электрода	Диаметр, мм: присадочной проволоки	Ток, А	Расход аргона в горелку,* л/мин
2	Без разделки	1	1,5—2,0	1,0—1,5	75—90	8—10
4		2	2,0—2,5	2,0	80—100	
4	V-образная	2	2,0—2,5	2,0—2,5	80—100	8—10
6		3		2,5—3,0	90—110	10—12
10		4	2,5—3,0		100—120	
6	X-образная	3	2,0—2,5	2,5—3,0	90—120	10—12
8		4	2,5—3,0			
10			3,0	3,0	100—120	

*Расход аргона в подкладку 2—3 л/мин.

19. Ориентировочные режимы автоматической аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом сплавов Н70МФ и ХН65МВ без разделки кромок

Толщина металла, мм	Сварка без присадки: Число проходов	Сварка без присадки: Ток, А	Сварка без присадки: Напряжение дуги, В	Сварка с присадочной проволокой: Число проходов	Сварка с присадочной проволокой: Ток, А	Сварка с присадочной проволокой: Напряжение дуги, В
1,5	—	—	—	1	85—90	10—12
2,0	1—2	100—120	10—12	1—2	120—150	
3,0	2	170—200	13—15	2	190—200	12—14
4,0		230—250	14—17	—	—	—

При сварке применяют аргон марки А. Защиту газом рекомендуется производить и со стороны подкладки.

Состав присадочного металла или сварочной проволоки идентичен составу основного металла (табл. 20). Сварные соединения некоторых сплавов типа

ХН70МФ, ХН65МВ подлежат термической обработке по режиму: нагрев до 1050° С, выдержка 3 мин на 1 мм толщины, но не менее 20 мин, охлаждение в воде.

20. Проволока для аргонодуговой сварки никеля и никелевых сплавов

Сплав	Проволока	Сплав	Проволока
НП2 Н70МФ	Н-1 Н70М27	ХН67МВТЮ ХН65МВ Х15Н60, Х20Н80	ЭП356 ХН65МВ Х15Н60, Х20Н80

При сварке конструкций из жаростойких сплавов первый проход (корневой шов) рекомендуется выполнять без присадочной проволоки. Не расплавленный в корневом шве основной металл обладает достаточной сопротивляемостью образованию горячих трещин, а каждый последующий проход выполняют после охлаждения предыдущего до температуры ниже 90° С. Некоторые механические свойства сварных швов при аргонодуговой сварке приведены в табл. 13—15 и 21—23.

21. Механические свойства сварных соединений никеля НП2 при аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом

Температура испытания, °С	Марка присадочной проволоки			
	Типа НМцАТ3-1-0,6		Н-1	
	$\sigma_в$, кгс/мм²	$a_н$, кгс·м/см²	$\sigma_в$, кгс/мм²	$a_н$, кгс·м/см²
−196	65,4	20,8	63,0	20,6
+20	44,7	19,8	43,0	20,0
+300	39,2	16,9	36,7	13,1
+800	9,2	17,6	8,8	10,3

22. Механические свойства сварных соединений сплавов Н70МФ и ХН65МВ, выполненных ручной аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом

Условия сварки	Температура испытания, °С			
	−60	+20	+400	+600
Без термической обработки:		**Н70МФ**		
$\sigma_в$	80,2	79,8	73,1	65,4
$a_н$	6,2	7,3	8,6	7,0
Термическая обработка:				
$\sigma_в$	79,3	78,2	72,5	64
$a_н$	15,7	14,7	17,4	14,7
Без термической обработки:		**ХН65МВ**		
$\sigma_в$	76,8	77,5	66,9	64,3
$a_н$	19,3	20,1	20,8	19,8

Примечания: 1. $\sigma_в$, кгс/мм²; $a_н$, кгс·м/см². 2. Термическая обработка сплава Н70МФ: 1056°С, 30 мин, охлаждение в воду.

23. Жаропрочность сварных соединений некоторых никелевых сплавов

Сплав	Сварка	Испытуемый образец	Условия испытания: Температура, °С	Условия испытания: Напряжение, кгс/мм²	Время до разрушения, ч	Относительное удлинение δ, %	Относительное сужение поперечного сечения ψ, %	Место разрушения
НХ77ТЮР (ЭИ437Б)	—	Основной металл	700	44	115	—	—	—
	Электронно-лучевая	Сварное соединение			89	3,07	6,4	По шву
НХ77ТЮР (ЭИ437Б)	Аргонодуговая	Сварное соединение	700	44	30	1,3	11,5	По шву
ХН60ВТ (ЭИ868)	—	Основной металл	800	10	128	29,8	49	—
	Электронно-лучевая	Сварное соединение			203	37,3	45	По основному металлу
	—	Основной металл*			182	33	51,3	—
	Электронно-лучевая	Сварное соединение*			115	14,1	26,2	По шву
ХН67МВТЮ (ЭП202)	—	Основной металл	800	25	130	7,6	16,0	—
	Электронно-лучевая	Сварное соединение			110	7,0	15,3	—

*Аустенизация 1200°С, 1 ч, воздух.

Диффузионная и электронно-лучевая сварка

Диффузионную сварку выполняют в вакууме при температурах ниже температуры плавления свариваемых металлов. В процессе сварки отсутствует первичная кристаллизация соединяемых металлов. В результате сварные соединения имеют высокие эксплуатационные характеристики при сохранении геометрических размеров изделий. Наиболее часто этот способ сварки используют в приборостроении и электронной технике.

Одной из характерных особенностей диффузионной сварки является очистка свариваемых поверхностей деталей от окислов путем их диссоциации или возгонки. Никель, сплавы типа монеля и константана, содержащие, кроме никеля, железо и медь, имеют на поверхности пленки, которые хорошо удаляются в вакууме при нагреве. Жаропрочные сплавы, содержащие хром, алюминий, титан и другие элементы, обладающие большим сродством к кислороду, образуют на поверхности деталей плотные и прочные пленки, которые при нагреве до 1175° С и разрежении до 10^{-5} мм рт. ст. не диссоциируют и не возгоняются. В результате затрудняется сварка и снижаются свойства сварных соединений. Для предупреждения этого применяют стеарин, наносимый на свариваемые поверхности, кото-

рые восстанавливают металл из окислов. Однако при сварке жаропрочных сплавов, для предупреждения снижения свойств сварного соединения из-за науглероживания металла, следует дозировать количество углерода. Применение самофлюсующихся расплавляемых промежуточных прослоек (типа никель—хром—бор), содержащих бор, литий, калий и другие элементы, способные восстанавливать и растворять прочные окислы и образовывать с ними легкоплавкие эвтектики, испаряющиеся в процессе сварки, также улучшает качество сварных соединений.

Молибден, вольфрам, ванадий и другие элементы, вводимые в жаропрочные стали, снижают скорость диффузии базовых элементов сплава. В результате для сварки жаропрочных сталей требуются повышенные температура и давление по сравнению с температурой и давлением при сварке углеродистых сталей. Режимы диффузионной сварки, приведенные в табл. 24, обеспечивают получение сварных соединений со свойствами, близкими к свойствам основного металла.

24. Режимы диффузионной сварки никеля и никелевых сплавов

Сплав	Температура нагрева, °С	Давление, кгс/мм²	Время выдержки, мин	Разрежение, мм рт. ст.	Примечание
НП1 НП2	1000	1,5	10	10^{-4}	Процесс можно осуществлять в среде водорода с точкой росы —40°С
ХН75МБТЮ (ЭИ602)	1150—1175	3—2	6—10	10^{-4}	Прослойка на никелевой основе с 20—35 % Mn, δ = =0,06 ÷ 0,1 мм
ХН80ТБЮА (ЭИ607А)	1200	2	6	10^{-4}	После сварки производят термическую обработку: выдержка при 1000°С, 2 ч; при 750°С, 20 ч
ХН65ВМТЮ (ЭИ893)	1170	2	20	10^{-4}	—
ХН60ВТ (ЭИ868)	1000	2	20	$5 \cdot 10^{-4}$	Последующая термическая обработка: выдержка при 1200°С, 20 мин

Электронно-лучевую сварку можно применять для всех сплавов, свариваемых другими способами, а также для сплавов, которые до последнего времени считались трудносвариваемыми. Этим способом можно сваривать материалы различных толщин и, что особенно важно для никелевых сплавов, — за один проход с большой скоростью. Сварные соединения имеют высокие эксплуатационные свойства.

Контактная сварка

Никель и никелевые сплавы хорошо свариваются точечной сваркой между собой, а также со сталями и многими медными сплавами. Электрическое сопротивление низкоуглеродистого никеля незначительно выше, чем электрическое сопротивление сталей; у никелевых сплавов, особенно у жаростойких, оно более высокое (в 10—15 раз). Поэтому сварочный ток и давление при точечной сварке низкоуглеродистого никеля примерно такие же, как и при сварке низкоуглеродистых сталей. Однако с ростом электрического сопротивления сплава сварочный ток должен уменьшаться; при этом должно увеличиваться давление на электроды. Сварку теплоустойчивых сплавов выполняют с высоким давлением на электроды и усиленным охлаждением свариваемого металла. С этой целью электроды и изделие погружают в воду или омывают струей воды. В связи с применением высоких давлений электроды необходимо изготовлять из сплавов высокой твердости. При сварке никеля и его сплавов можно применять сферические или конические электроды с плоским торцом. Диаметр электродов для свариваемых листов толщиной 0,5—1,5; 1,5—2,5; 2,5—3,0 мм выбирают равным соответственно 3—6, 6—8 и 8—10 мм. Перед сваркой поверхности деталей тщательно зачищают или подвергают травлению.

Для получения качественных сварных соединений необходимо выбирать минимальный ток и время его протекания, чтобы избежать излишнего перегрева металла и связанных с ним дефектов. Ориентировочные режимы точечной сварки технического никеля и некоторых его сплавов приведены в табл. 25.

25. Ориентировочные режимы точечной сварки никеля и его сплавов

Материал	Толщина листа, мм	Давление на электроды		Сварочный ток, А	Время сварки, с
		Сила прижатия, кгс	Давление, кгс/см²		
НП1	0,5—0,8	112	1400	7 760	0,51—0,67
	0,9—1,5	193	2150	9 200	
	1,6—2,2	780		21 600	0,83—1,0
	2,3—2,5	1050	2100	26 400	1,67—2,0
	2,5—3,2	1500		30 800	2,67—3,34
Монель	0,5—0,8	184	1050	6 200	1,67—2,0
	0,9—1,5	313	1750	10 600	
	1,6—2,2	890	2800	15 300	
	2,3—2,5	1220	2450	20 000	2,67—3,34
	2,5—3,2	1750		21 300	4,18—5,0
Сплавы никеля с железом	0,5—0,8	84	1050	4 040	1,67—2,0
	0,9—1,5	167	2100	3 730	
	1,6—2,2	890	2800	6 100	2,67—3,34
	2,3—2,5	1400		12 700	
	2,5—3,2	2400	2450	20 100	4,18—5,0
Сплавы никеля с хромом	0,5	85	1050	4 040	0,20
	0,8	300	1750	6 710	
	1,5	1100	3500	9 300	
	2,5	1400	2800	12 700	0,33

Соединения деталей из никеля и его сплавов можно также успешно выполнять шовной и стыковой контактной сваркой. Некоторые данные о механических свойствах сварных соединений приведены в табл. 26.

26. Прочность (кгс/мм²) сварных соединений из сплава ХН60ВТ после старения при различных способах сварки

Сварка	Температура испытания, °С		
	20	800	900
	При старении после сварки		
Аргонодуговая	105	52—55	32—36
Шовная	90	31—36	23—30
Точечная	895	325—480	325—480
	При старении до сварки		
Аргонодуговая	90	31—34	31—34
Шовная	—	19—24	19—24

Примечание. Режим старения: 800°С, 2 ч; охлаждение на воздухе.

Список литературы

1. **Казаков Н. Ф.** Диффузионная сварка материалов. М., «Машиностроение», 1976. 252 с.
2. **Медовар Б. И.** Сварка жаропрочных аустенитных сталей и сплавов. М., «Машиностроение», 1966. 431 с.
3. **Химушин Ф. Ф.** Жаропрочные стали и сплавы. М., «Металлургия», 1964. 350 с.

Глава 13
СВАРКА ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ И ИХ СПЛАВОВ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

К тугоплавким относят металлы с температурой плавления выше, чем температура плавления железа (1535° С). За исключением титана все тугоплавкие металлы относятся к редким элементам. Однако их применение в технике быстро расширяется в связи с ценными свойствами, основные из которых приведены в табл. 1 [10, 13, 21, 25]. Наиболее тугоплавкими являются вольфрам, рений, тантал и осмий. В качестве жаропрочных наибольшее применение имеют сплавы на основе ниобия, тантала, молибдена, вольфрама.

Показателями свариваемости тугоплавких металлов являются: а) активность по отношению к атмосферным газам как в расплавленном, так и в твердом состояниях при повышенных температурах; б) сопротивляемость образованию технологических трещин и трещин замедленного разрушения; в) чувствительность к теплофизическому воздействию сварочного процесса, которая определяется склонностью к росту зерна, протеканием структурных и фазовых превращений при охлаждении и старении, неоднородностью свойств соединения; г) чувствительность к образованию пор; д) соответствие свойств сварных соединений эксплуатационным требованиям.

Свариваемость тугоплавких металлов определяется: а) химической активностью; б) растворимостью примесей внедрения и чувствительностью к ним; в) типом кристаллической решетки, полиморфизмом; г) типом и степенью легирования; д) теплофизическими свойствами.

Химическая активность тугоплавких металлов характеризуется физико-химическими свойствами, приведенными в табл. 1. Химическая активность в целом уменьшается от IV к VIII группе. Все тугоплавкие металлы при повышенных температурах, характерных для сварки плавлением, активно взаимодействуют с атмосферными газами и другими окислителями (рис. 1), являющимися примесями внедрения, которые резко ухудшают пластические свойства и большинство технологических характеристик (деформируемость в холодном и горячем состоянии, обрабатываемость резанием и особенно свариваемость). Взаимодействие тугоплавких металлов с газами происходит путем адсорбции и хемосорбции газа, растворения и диффузии газа в металле, образования продуктов взаимодействия. Закономерности окисления тугоплавких металлов — изменение скорости окисления в зависимости от времени, фазовый состав и структура образующихся на их поверхности оксидных пленок, а также развитие процессов насыщения поверхностных слоев определяются физико-химическими свойствами металла и температурой (табл. 2) [10, 13, 21].

Логарифмические и параболические закономерности характеризуют окисление с замедляющейся скоростью и образованием защитных пленок. Линейная зависимость характерна для окисления, протекающего с постоянной скоростью, приводящей к химической коррозии металла, насыщению его кислородом и охрупчиванию. Защитные пленки при взаимодействии с кислородом образуются только при относительно низких температурах. Металлы IV и V групп обладают наиболее высокой химической активностью и реагируют активно с окружающей средой, образуя оксиды, гидриды, нитриды, карбиды, бориды, силициды. Металлы VI группы менее активны, чем металлы других групп, однако, особенно при высоких температурах, они реагируют со всеми элементами-окислителями. Рений (металл

1. Свойства тугоплавких металлов

Свойства	Группа периоди											
	IV			V			VI			VII	VIII						
	Ti	Zr	Hf	V	Nb	Ta	Cr	Mo	W	Re	Fe	Ru	Os	Rh	Ir	Pd	Pt
Атомные, физико-химические, кристаллографические																	
Атомный номер	22	40	72	23	41	73	24	42	74	75	26	44	76	45	77	46	78
Атомная масса	47,9	91,2	178,5	50,9	92,9	180,9	52	95,9	183,9	186,2	55,8	101,1	190,2	102,9	192,2	106,4	195,1
Атомный радиус, Å	1,46	1,60	1,58	1,31	1,43	1,43	1,25	1,36	1,37	1,37	1,24	1,34	1,35	1,34	1,35	1,37	1,39
Строение внешнего электронного уровня	d^2s^2	d^2s^2	d^2s^2	d^3s^2	d^4s^1	d^3s^2	d^5s^1	d^5s^1	d^4s^2	d^5s^2	d^6s^2	d^7s^1	d^6s^1	d^8s^1	d^7s^2	$d^{10}s^0$	d^9s^1
Потенциал ионизацин, В	6,8	6,8	7,6	6,8	6,8	7,6	6,8	7,2	7,9	7,8	7,8	7,5	8,7	7,7	8,7	7,7	8,8
Стандартный электродный потенциал, В	−1,75	−1,5	−1,7	−1,5	−1,1	—	−0,71	−0,2	−1,1	−1	−0,44	+0,45	+1,0	—	+0,83	+0,6	+1,2
Кристаллическая структура	α-ГПУ β-ОЦК	α-ГПУ β-ОЦК	α-ГПУ β-ОЦК	ОЦК	ОЦК	ОЦК	ОЦК	ОЦК	ОЦК	ГПУ	α-ОЦК γ-ГЦК	ГПУ	ГПУ	ГЦК	ГЦК	ГЦК	ГЦК
Поперечное сечение захвата нейтронов, барн	5,8	0,18	115	4,98	1,15	21	3,1	2,4	19,2	86	2,53	2,56	15,3	156	440	8	8,8
Плотность, г/см³	4,5	6,5	13,1	6,1	8,6	16,7	7,2	10,2	19,3	21	7,9	12,3	22,6	12,4	22,6	12	21,5
Термические, электрические																	
Температура, °С:																	
плавления	1668	1852	2222	1900	2468	3000	1875	2625	3380	3180	1539	2250	3045	1966	2445	1552	1769
кипения	3260	3700	5400	3400	4927	5425	2200	5560	5900	5630	3200	4900	5500	4500	5300	3180	4530
Удельная теплота, кал/г:																	
плавления	104	60,3	29,1	82,5	65	41,5	61,5	69,8	46	42,4	75	60,3	36,9	50,5	32,6	—	24,1
испарения	2350	1360	885	2150	1782	995	1474	1222	1038	815	1500	1340	790	1150	790	—	625
Удельная теплоемкость при 20° С, $\times 10^3$, кал/(г·°С)	129	66	33	120	65	35	107	58	32	33	106	57	39	59	32	54	31
Коэффициент теплопроводности, $\times 10^3$, кал/(см·с·°С)	41	40	53	74	124	130	160	300	310	170	170	170	—	360	350	170	170
Коэффициент линейного расширения, $\times 10^6$, 1/°С	8,15	5,85	5,9	10,6	7,1	7,2	6,2	5,44	4,45	6,63	11,7	9,4	4,7	8,3	6,6	12,4	14,1
Удельное электросопротивление, мкОМ · см	45	41,1	35,1	24,8	12,7	13,5	12,8	5,78	5,5	19,1	9,9	7,2	9,5	4,5	5,3	10,8	10,6
Упругие, механические																	
Модуль нормальной упругости, $\times 10^{-3}$, кгс/мм²	11,2	8,96	14,1	13,5	10,5	18,8	24	33,6	39	47	20,6	42	57	28,6	53,8	11,5	15,3
Модуль сдвига, $\times 10^{-3}$, кгс/мм²	3,94	3,33	5,4	4,45	3,82	7	9,2	12,2	15	15,8	8,15	—	—	—	—	—	—
Коэффициент Пуассона	0,34	0,35		0,36	0,39	0,35	0,3	0,31	0,3	0,49	0,3	—	—	—	—	—	—
Предел, кгс/мм²:																	
прочности	25	22	45	20	25	20	42	48	55	115	29	15	—	56	40	20	15
текучести	12	8	29	11	19	19	37	39	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Относительное удлинение, %	55	45	40	40	60	50	44	42	13,5	25	—	—	—	45	—	27	31
Поперечное сужение, %	75	—	40	75	80	90	78	38	—	22	—	—	—	—	10	—	92
Твердость *HV*	60	67	160	57	87	90	105	210	340	265	50	216	400	120	200	35	36

VII группы) обладает пониженной активностью по сравнению с предыдущими металлами, однако отсутствие пассивирующихся поверхностных слоев делает его достаточно активным и взаимодействующим с окружающей средой. Химическая активность тугоплавких металлов VIII группы значительно ниже, чем у металлов IV, V и VII групп.

2. Предельная растворимость примесей внедрения, температура взаимодействия с примесями и закономерности окисления тугоплавких металлов

Группа	Металл	Предельная растворимость, %			
		H	O	N	C
VI	Титан	< 0,001	3	2	< 0,1
	Цирконий	< 0,001		3,5	< 0,1
	Гафний	< 0,01	—	—	< 0,1
V	Ванадий	1	0,3	0,5	0,1
	Ниобий	0,5	0,1	0,03	0,01
	Тантал	0,4	0,02	0,1	0,007
VI	Хром	0,00001—0,0001	0,00001	0,00001	0,00001—0,0001
	Молибден	0,00001	0,0001	0,0001	0,00001—0,0001
	Вольфрам	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001
VII	Рений	—	—	—	—

Группа	Металл	Температура взаимодействия, T °C			Закономерность окисления при T °C		
		H_2	O_2	N_2	Логарифмическая	Параболическая	Линейная
IV	Титан	275	250	550	< 200	200—600	> 600
	Цирконий	300	250	600	< 200	200—900	> 900
	Гафний	—	350	—	< 350	350—800	> 800
V	Ванадий	300	400	800	< 400	600	> 600
	Ниобий	250	200—250	350	< 150	150—400	> 400
	Тантал	500	300	450	< 300	300—500	> 500
VI	Хром	400	700	650	< 700	700—1100	> 1100
	Молибден	400	400	1500	< 400	400—600	> 600
	Вольфрам	Инертен	400	Инертен	< 400	400—1000	> 1000
VII	Рений	Инертен	300	Инертен	< 300	300—600	> 600

Степень влияния примесей внедрения на свойства тугоплавких металлов зависит от их предельной растворимости в металле (рис. 2), типа кристаллической решетки, характера образующихся соединений; чем меньше растворимость, тем больше это влияние. Резкое охрупчивание металлов, вызываемое примесями внедрения, связано прежде всего с выделением их в виде соединений (оксидов, нитридов, гидридов, карбидов) по границам зерен при содержании больше предельной растворимости. Примеси внедрения, находящиеся в твердом растворе,

ухудшают пластические свойства тугоплавких металлов, главным образом из-за торможения движения дислокаций и уменьшения сопротивляемости образованию и развитию трещин.

Наиболее чувствительны к охрупчиванию мономорфные металлы V и VI групп, имеющие объемно-центрированную кубическую решетку. Характерной особенностью этих металлов является их хладноломкость, т. е. переход из пластичного состояния в хрупкое в некотором интервале температур (за исключением тантала) (рис. 3, 4).

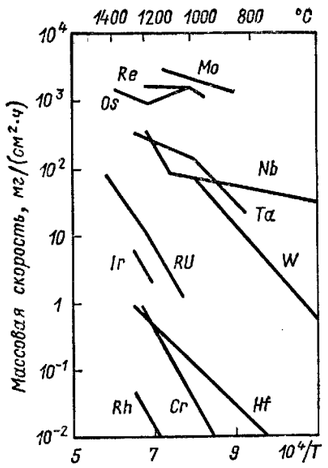


Рис. 1. Скорость окисления тугоплавких металлов при различных температурах (по данным Р. Джаффи) [13]

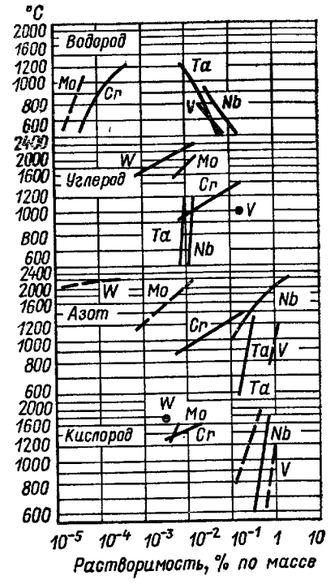


Рис. 2. Максимальная растворимость примесей внедрения в тугоплавких металлах (по данным Г. Т. Хана и др.) [13]

Металлы высокой чистоты сохраняют высокие пластические свойства. Наибольшей хладноломкостью, т. е. высокой температурой перехода в хрупкое состояние, обладают металлы VI группы, особенно вольфрам, в связи с исчезающе малой растворимостью примесей внедрения, которая почти на три порядка меньше, чем у элементов V группы (см. рис. 2). Даже рафинированные металлы VI группы являются, по-видимому, по отношению к примесям внедрения пересыщенными твердыми растворами или двухфазными. Для металлов V группы по степени влияния на возникновение хрупкости примеси внедрения располагаются в следующем порядке: водород, азот, кислород, углерод; для металлов VI группы: углерод, кислород, азот, водород. Из тугоплавких металлов хладноломкими являются также рутений и осмий, имеющие гексагональную плотноупакованную решетку.

На свариваемость сплавов на основе тугоплавких металлов влияет состав сплавов и содержание легирующих элементов.

Имеются несколько основных путей получения качественных сварных соединений.

1. Высокая чистота исходных материалов (основного и присадочного металла, защитных материалов), обеспечивающая минимально допустимое содер-

жание примесей; в некоторых случаях целесообразно применять специальные присадочные материалы, улучшающие пластические свойства соединения.

2. Применение техники и технологии сварки, гарантирующих качественную защиту, минимальное содержание примесей. Главным технологическим требованием при сварке тугоплавких металлов является изоляция от атмосферы расплавленного металла и металла, нагреваемого в процессе сварки до температур

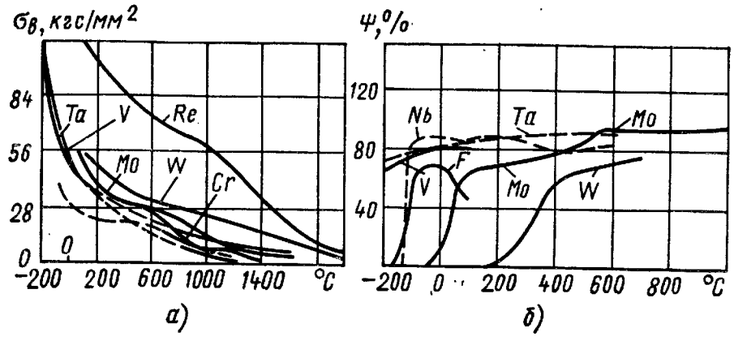


Рис. 3. Зависимость предела прочности при растяжении (*а*) и относительного сужения (*б*) тугоплавких металлов от температуры [13]

начала его реакции с газами; для этого следует использовать инертные газы высокой чистоты (аргон высшего сорта по ГОСТ 10157—73, гелий по ВЧ МРТ4 51-04—65) или вакуум при давлении не выше $3 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Наряду с защитой необходима тщательная подготовка деталей под сварку: зачистка (не допускаются

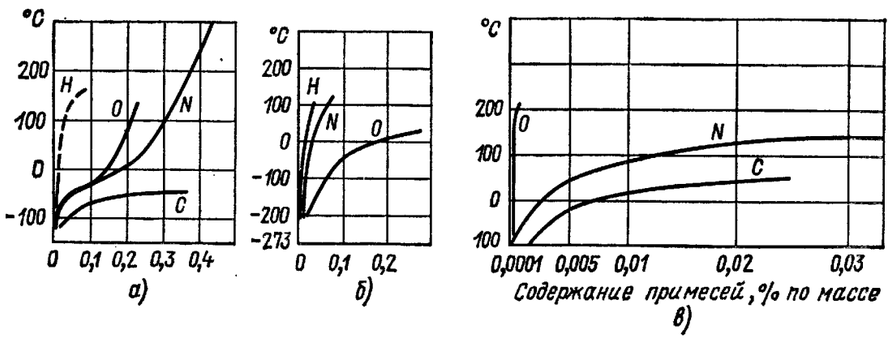


Рис. 4. Влияние примесей на температуру хладноломкости ванадия (*а*), ниобия (*б*) и молибдена (*в*) [10]

расслоения, заусенцы и другие дефекты), травление для удаления поверхностных окислов, промывка, сушка, обезжиривание, обезвоживание. Наряду с металлом необходимо очищать и обезвоживать сварочные приспособления и инструменты.

3. В связи с высокой чувствительностью тугоплавких металлов и особенно сплавов к термическому циклу (склонность к росту зерна, перегреву, структурным превращениям с образованием промежуточных фаз) сварку нужно производить на режимах, обеспечивающих оптимальные свойства и формирование соединения.

Повышение свойств сварных соединений сплавов достигается термической, а также термомеханической обработкой.

4. Улучшение напряженного состояния в сварных соединениях за счет рационального конструирования сварных узлов, направленного на уменьшение жесткой схемы напряженного состояния, уменьшение и снижение остаточных напряжений.

Для соединения тугоплавких металлов применяют преимущественно сварку плавлением: дуговую в среде инертных газов (в камерах и со струйной защитой); электронно-лучевую, вакуумно-дуговую, полым катодом, лазерную; под флюсом (для титана). Для некоторых изделий используют контактную сварку, диффузионную, ультразвуковую, взрывом, трением, холодную давлением, химическим осаждением металла из жидкой фазы.

В отличие от сталей ручная дуговая сварка жаропрочных металлов покрытыми электродами не нашла широкого применения в связи с высокой активностью и чувствительностью к примесям большинства этих металлов.

В соответствии с физико-химическими свойствами и расположением в периодической системе тугоплавкие металлы IV группы периодической системы обладают хорошей свариваемостью; V группы — удовлетворительной, VI группы — ограниченной, VII и VIII групп — хорошей.

Технику и технологию сварки тугоплавких металлов и их сплавов рассмотрим в соответствии с распределением их по группам периодической системы Д. И. Менделеева.

СВАРКА ТИТАНА, ЦИРКОНИЯ И ГАФНИЯ

Титан, цирконий, гафний по свариваемости являются аналогами в связи с общностью химических и кристаллографических свойств. Режим сварки зависит от их теплофизических свойств (температуры и теплоты плавления, теплоемкости, вязкости при различных температурах). Характерными общими особенностями металлов этой группы являются:

а) наиболее высокая (среди тугоплавких металлов) химическая активность по отношению к кислороду, азоту, водороду, с которыми они соединяются непосредственно при повышенных температурах с образованием устойчивых соединений, вызывающих резкое охрупчивание металла; оксиды и нитриды устойчивы при низких и высоких температурах; температура плавления оксидов Ti, Zr, Hf составляет соответственно 1820, 2710, 2811° С, нитридов Ti — 3205° С, Zr — 2980°С; гидриды этих металлов устойчивы при низких температурах, но при 700—800° С разлагаются, что существенно изменяет растворимость водорода;

б) высокая чувствительность к термическому циклу сварки, связанная с протеканием полиморфного $\alpha \rightleftarrows \beta$-превращения, резким ростом зерна высокотемпературной β-фазы при нагреве выше температуры полиморфного превращения, перегревом и образованием хрупких фаз при охлаждении и старении;

в) склонность к замедленному разрушению; характерной особенностью чистых металлов этой группы является высокая сопротивляемость горячим трещинам при сварке, главным образом в связи с малым температурным интервалом хрупкости, а также теплофизическими свойствами при повышенных температурах; однако металлы этой группы проявляют склонность к замедленному разрушению вследствие водородного охрупчивания при наличии растягивающих напряжений I рода; это явление резко интенсифицируется при наличии дополнительных охрупчивающих факторов: повышенном содержании примесей, неблагоприятных структурах, жестком напряженном состоянии;

г) в металлах и сварных соединениях этой группы наблюдается значительная анизотропия свойств в связи с тем, что низкотемпературная α-модификация имеет гексагональную плотноупакованную решетку, для которой характерно это явление.

Сварка титана и титановых сплавов

Сплавы титана и их свариваемость [4, 5, 10, 14, 18, 20, 24—28]. Титан имеет две аллотропические модификации: высокотемпературную β—Ti с объемно-центрированной кубической решеткой и низкотемпературную α—Ti с гексагональной плотноупакованной. Температура полиморфного превращения титана $\alpha \rightleftarrows \beta$ в равновесных условиях равна 882,5° С. Плотность α—Ti (4,506—4,56 г/см³) выше плотности β—Ti (4,471 г/см³ при 400° С), поэтому превращение высокотемпературной фазы в низкотемпературную $\beta \rightarrow \alpha$ сопровождается в отличие от сталей уменьшением объема (~0,13%) и не дает достаточно сильного внутрифазного наклепа.

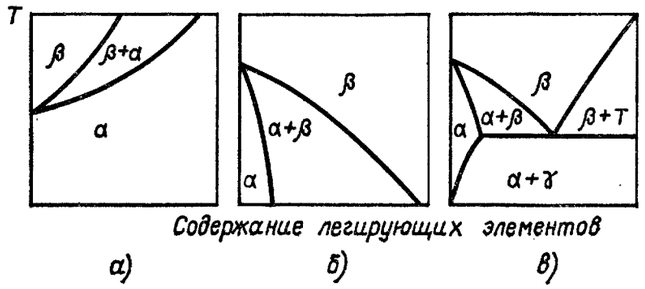


Рис. 5. Схема влияния легирующих элементов на температуру полиморфного превращения титана и структурные диаграммы

Легирующие элементы по влиянию на полиморфизм титана (температуру превращения, растворимость, стабилизацию той или иной фазы) могут быть разделены на следующие группы: 1) α-стабилизаторы; 2) β-стабилизаторы; 3) нейтральные упрочнители (Zr, Hf, Sn), мало влияющие на температуру полиморфного превращения (рис. 5); α-стабилизаторы повышают температуру $\alpha \rightarrow \beta$-превращения (рис. 5, *а*), значительно растворяются в α-фазе и незначительно в β-фазе. Алюминий, стабилизирующий α-фазу, является основным легирующим элементом для титана, благодаря дешевизне, малой плотности, эффективному упрочнению как α-, так и β-фаз, повышению жаропрочности титановых сплавов. За пределами растворимости (7,5% в α-фазе) алюминий образует с титаном хрупкое интерметаллидное соединение Ti_3Al. β-стабилизаторы делятся на две основные группы: изоморфные — неограниченно растворяющиеся в β-фазе (V, Nb, Ta, Mo, W) (рис. 5, *б*), и эвтектоидообразующие, обладающие большей, но ограниченной растворимостью в β-фазе, чем в α-фазе (рис. 5, *в*). К их числу относятся (в порядке повышения температуры эвтектоидного превращения и жаропрочности) Mn, Fe, Cr, Co, Ni, Cu, Si, а также Pb, Be, Ag, Au и др. При определенных концентрациях и температурных условиях эвтектоидообразующие β-стабилизаторы образуют с титаном интерметаллидные соединения вследствие эвтектоидного превращения, при котором β-фаза распадается на α- и γ-фазы. По интенсивности стабилизации β-фазы элементы можно расположить в следующем порядке: Fe, Mn, Cr, Mo, V, Nb, Ta. При содержании в титане β-стабилизирующих элементов больше критического (12% Mo, 15% V, 8% Cr, 4% Mn, 6,5% Fe) β-фаза может быть зафиксирована при 20° С.

В зависимости от содержания α-стабилизаторов (А), β-изоморфных ($B_и$) и эвтектоидных ($B_э$) стабилизаторов и нейтральных упрочнителей (N) типы титановых сплавов сводятся к следующим: Ti—A, Ti—A—N, Ti—A—$B_э$, Ti—A—$B_и$, Ti—A—$B_э$—$B_и$, Ti—A—$B_э$—N, Ti—A—$B_и$—$B_э$—N. В зависимости от структуры в нормализованном состоянии титановые сплавы подразделяют на следующие классы (табл. 3): 1) α-сплавы, структура которых представлена α-фазой; 2) α + β-сплавы, структура которых представлена α- и β-фазами; 3) β-сплавы, структура которых представлена механически стабильной β-фазой. Кроме этого, выделяются два переходных класса: а) псевдо α-сплавы, структура которых состоит из α-фазы и небольшого количества β-фазы (не более 5%); б) псевдо β-сплавы, структура которых представлена метастабильной β-фазой и небольшим количеством α-фазы. α-сплавы могут быть термически неупрочняемыми и упрочняемыми вследствие дисперсионного твердения; α + β-сплавы — твердеющие или мягкие после закалки; β-сплавы могут быть с β-фазой механически стабильной, механически нестабильной и термодинамически стабильной.

По гарантированной прочности титановые сплавы подразделяют: а) на малопрочные высокопластичные с $\sigma_в < 70$ кгс/см²; б) на среднепрочные с $\sigma_в = 75 \div 100$ кгс/мм²; в) на высокопрочные с $\sigma_в > 100$ кгс/мм².

3. Структура, состав и механические свойства промышленных титановых сплавов

Сплавы	Марка сплава	Средний химический состав, %	Механические свойства	
			$\sigma_в$, кгс/мм²	δ, %
α	ВТ1-00	Нелегированный титан	30—45	30
	ВТ1-0		40—55	30
	ВТ1-1		45—60	25
	ВТ5	5,0 Al	75—90	10
	ВТ5-1	5 Al; 2,5 Sn	75—90	12
	4200	0,2 Pd	—	—
Псевдо α	ОТ4-0	0,8 Al; 0,8 Mn	50—65	30
	ОТ4-1	1,5 Al; 1,0 Mn	60—75	20
	ОТ4	3,5 Al; 1,5 Mn	70—90	15
	ВТ4	5,0 Al; 1,5 Mn	85—100	12
	ОТ4-2	6,0 Al; 1,5 Mn	100—120	10
	АТ2	2,0 Zr; 1,0 Mo	60—70	20
	АТ3	3,0 Al; 1,5 (Fe, Cr, Si, B)	75—90	12
	АТ4	4,0 Al; 1,5 (Fe, Cr, Si, B)	85—105	10
	ВТ20	6,0 Al; 2,0 Zr; 1,0 Mo; 1V	95—115	8
	ТС5	5,0 Al; 2,0 Zr; 3,0 Sn; 2 V	95—110	8
α + β	ВТ6С	5,0 Al; 4,0 V	90—95	10
	ВТ6	6,0 Al; 4,5 V	90—105; 110*	7
	ВТ3-1	6,0 Al; 2,5 Mo; 2,0 Cr; 0,3 Si; 0,5 Fe	100—120; 120*	10 6
	ВТ14	4,5 Al; 3,0 Mo; 1,0 V	90—105; 120*	8 6
	ВТ16	2,5 Al; 5,0 Mo; 5,0 V	80—95; 120—130*	15 6
	ВТ22	5,0 Al; 5,0 Mo; 5,0 V; 1 Fe; 1 Cr	110—125; 140—155*	8 5
	ВТ23	4,5 Al; 2,0 Mo; 4,5 V; 0,6 Fe; 1 Cr	140*	5
Псевдо β	ВТ15	3,0 Al; 7,0 Mo; 11,0 Cr	135—150*	4
	ТС6	3,0 Al; 5,0 Mo; 6,0 V; 11,0 Cr	140—150*	4
β	4201	33,0 Mo	—	—

Примечание. Механические свойства α- и псевдо α-сплавов приведены в отожженном состоянии; α + β- и псевдо β-сплавов — в отожженном, закаленном и состаренном состояниях (со звездочкой).

Применяют деформируемые и литейные сплавы. В табл. 3 представлены деформируемые сплавы, используемые для сварных конструкций. Разрабатываются новые сплавы со специальными свойствами (жаропрочные, хладостойкие, коррозионно-стойкие) на основе комплексного легирования. Например, серия α-сплавов типа СТ, имеющих высокую жаропрочность, специальными свойствами обладают сплавы типа ИРМ.

Механические свойства и структура титана и его сплавов зависят от примесей, которые разделяются на две группы: а) внедрения — O_2, N_2, C, являющиеся α-стабилизаторами, и H_2 — β-стабилизатор; б) замещения — Fe, Si (для титана). Влияние примесей внедрения значительно сильнее. Кислород снижает пластические свойства в области малых концентраций (до 0,1%); в интервале концентраций 0,1—0,5% он относительно мало влияет на пластичность, но при больших содержаниях (>0,7%) титан полностью теряет способность к пластическому деформированию. Азот охрупчивает титан в еще большей степени. При содержании его более 0,2% наступает хрупкое разрушение. Углерод влияет в меньшей степени, чем кислород и азот. Водород — вредная примесь в титановых сплавах. Растворимость водорода в титане при эвтектоидной температуре составляет 0,18%, но с понижением температуры резко падает (<0,0007%), что приводит к выделению вторичных гидридов, преимущественно по плоскостям скольжения и двойникования. Хрупкость, низкая прочность, пластинчатая форма гидридов и значительный положительный объемный эффект при образовании гидридов (~15,5%) — причины резкого охрупчивания титана при наводороживании.

Содержание примесей в сплавах титана допускается в следующих пределах (% по массе): $O_2 < 0{,}15 \div 0{,}20$; $N_2 < 0{,}05$; $H_2 < 0{,}006 \div 0{,}01$; $C < 0{,}1$; $Fe < 0{,}25 \div 0{,}30$; $Si < 0{,}15$; сумма прочих примесей не должна превышать 0,3%. Допустимое содержание примесей в техническом титане несколько меньше.

Основная проблема свариваемости титановых сплавов — получение сварных соединений с хорошей пластичностью, зависящей от качества защиты и чувствительности металла к термическому циклу сварки. Заметное насыщение металла шва кислородом, азотом и водородом в процессе сварки происходит при температурах $\geqslant 350°$ С. Это резко снижает пластичность и длительную прочность сварных конструкций. Поэтому зона сварки, ограниченная изотермой $\geqslant 350°$ С, должна быть тщательно защищена от взаимодействия с воздухом путем сварки в среде инертных защитных газов (аргона или гелия) высокой чистоты, под специальными флюсами, в вакууме. Сварка без защиты возможна при способах сварки давлением, когда благодаря высокой скорости процесса и вытеснению продуктов окисления при давлении (контактная сварка) или отсутствии высокого нагрева (ультразвуковая сварка) опасность активного взаимодействия металла в зоне сварки с воздухом сводится к минимуму.

При сварке в сплавах титана происходят сложные фазовые и структурные превращения. Чувствительность к сварочному термическому циклу выражается в протекании полиморфного превращения $\alpha \rightleftarrows \beta$, в резком росте размеров зерна β-фазы и перегреве на стадии нагрева, в образовании хрупких фаз при охлаждении и старении, неоднородности свойств сварных соединений, зависящих от химического и фазового состава сплавов. Вследствие низкой теплопроводности и малой объемной теплоемкости титана время пребывания металла при высоких температурах значительно больше, чем это время для стали, что является причиной перегрева, резкого увеличения размера зерен β-фазы и снижения пластичности титана. Превращение $\beta \rightarrow \alpha$ в зависимости от состава сплава и температурно-временных условий сварки может сопровождаться возникновением стабильной α и метастабильных фаз α', α'', $\alpha_м$, ω, $\beta_м$, а также γ-фазы; α'-фаза характеризуется закалочной игольчатой структурой мартенситного типа с искаженной гексагональной решеткой. Она образуется в низколегированных α-сплавах титана при быстром охлаждении, а также при пластической деформации метастабильной β-фазы; α''-фаза представляет собой мартенситную фазу. Она пластична, твердость ее меньше, чем твердость α-фазы. В связи с малым объемным эффектом мартенситного превращения α'- и α''-фазы в титане значительно более пластичны и менее хрупки, чем в сталях, что является благоприятным фактором при сварке; ω-фаза — метастабильная промежуточная низкотемпературная модификация титана, она наиболее сильно охрупчивает, упрочняет и снижает пластичность титана. Эвтектоидный распад β-фазы в титановых сплавах может приводить к столь резкому ухудшению механических свойств и охрупчиванию, что их практическое применение исключается.

Структурные состояния, возникающие при быстром охлаждении из β-области сплавов титана, иллюстрируются рис. 6. Мартенситное превращение происходит в интервале температур от $M_н$ до $M_к$, которые понижаются с увеличением содержания легирующих компонентов и в сплавах с переходными элементами при концентрациях $C'_{кр}$ и $C''_{кр}$ достигают 20°С. Эти концентрации называют первой и второй критической концентрацией. При концентрации легирующих компонентов до $C'_{кр}$ образуется α'-фаза (или α' и α'') в зависимости от системы легирования. При концентрации легирующих элементов от $C'_{кр}$ до $C''_{кр}$ мартенситное превращение не осуществляется до конца и поэтому структура сплавов представлена $\alpha'(\alpha'')$- и β-фазами. Если концентрация β-стабилизатора превышает вторую критическую ($C''_{кр}$), то фиксируется β-фаза. При содержании β-стабилизаторов, близком к $C''_{кр}$, в сплавах внутри β-твердого раствора возникает ω-фаза.

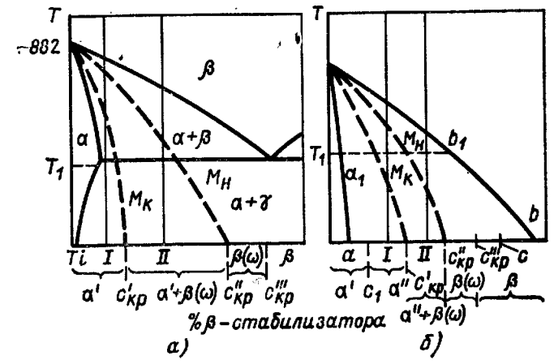


Рис. 6. Структуры, которые получаются при быстром охлаждении из β-области сплавов титана:

а — с β-эвтектоидными стабилизаторами; *б* — с β-изоморфными стабилизаторами [10]

В связи с тем, что термические циклы в зонах сварного соединения различны, в этих зонах возникают различные структурные состояния и неоднородность свойств (рис. 7). В сварных соединениях технического титана и стабильных α-сплавов образуются участки с характерными изменениями структуры и свойств: крупнокристаллический металл шва с игольчатой структурой α'-фазы; околошовная зона с резко увеличенным зерном и игольчатой структурой $\alpha + \alpha'$-фазы; зона частичной перекристаллизации β-фазы со смешанной структурой $\alpha + \alpha'$-фазы; за этой зоной следует постепенный переход к неизменной структуре прокатанного основного металла.

Легирование титана, как правило, ухудшает свариваемость, что выражается в большей чувствительности к термическому циклу — к явлениям, вызывающим понижение пластичности в связи с возможным образованием хрупких фаз при охлаждении и старении, в большей неоднородности сварного соединения. При этом наряду с мартенситным превращением ($\beta \rightarrow \alpha'$) могут происходить процессы образования промежуточных метастабильных фаз $\beta \rightarrow \beta + \omega \rightarrow \beta + \alpha(\alpha')$ и интерметаллидных соединений ($\beta \rightarrow \alpha + \gamma$), охрупчивающих металл. Диаграммы анизотермического превращения титановых сплавов при сварке приведены на рис. 8.

Диаграммы I типа характерны для технического титана ВТ1-1, его α-сплавов (ВТ5, ВТ5-1) и псевдо α-сплавов (ОТ4-0, ОТ4, ОТ4-1, ОТ4-2, АТ3, АТ4 и др.

Диаграммы II типа присущи $\alpha + \beta$-сплавам (ВТ6С, ВТ6, ВТ14), содержащим большое количество β-стабилизаторов, что обусловливает возможность вслед за

$\beta \rightarrow \alpha$-превращением промежуточного $\beta \rightarrow \omega$-превращения. Полиморфное превращение в сплавах I и II групп протекает по мартенситному механизму ($\omega = 3 \div 400$ °С/с). Характерен малый объемный эффект $\beta \rightarrow \alpha'$-превращения (0,13—0,27%).

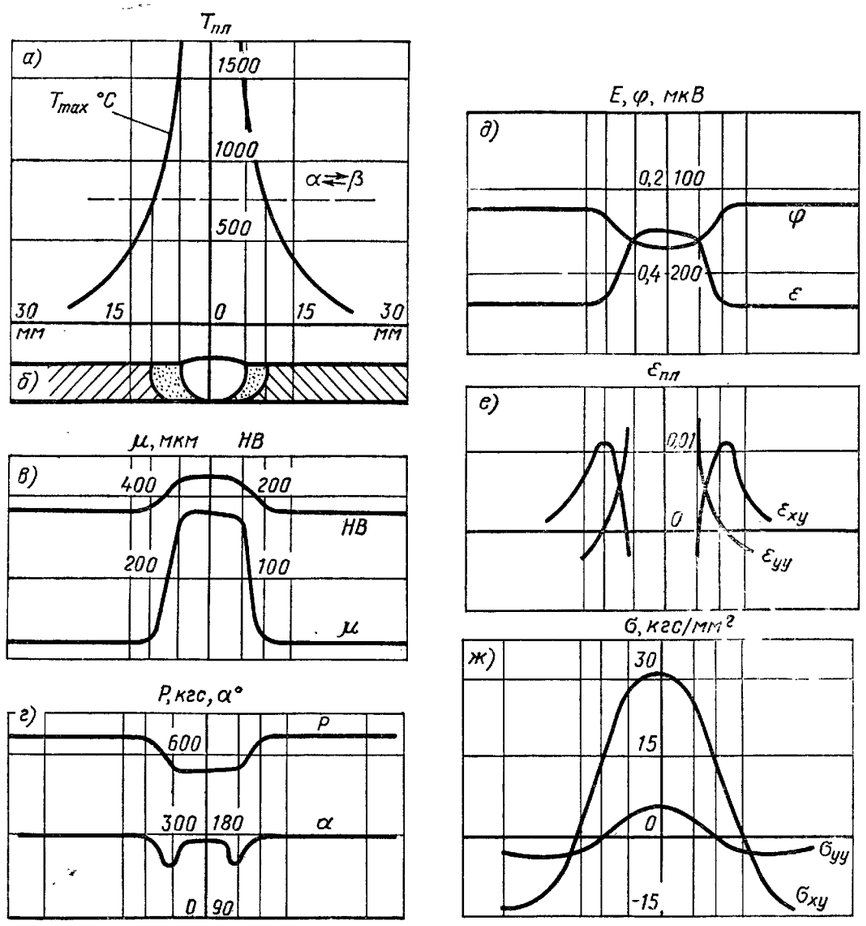


Рис. 7. Неоднородность свойств сварного соединения в поперечном сечении технического титана ВТ1-1 ($\delta = 2$ мм) при аргонодуговой сварке:

а — максимальные температуры; *б* — схема сварного соединения; *в* — твердость *HB* и размер зерна μ; *г* — механические свойства при изгибе (*P* — несущая нагрузка, α — угол изгиба); *д* — электродный φ (3% NaCl) и термоэлектрический *E* потенциалы (мкВ); *е* — остаточные пластические продольные ε_{xy} и поперечные ε_{yy} деформации; *ж* — остаточные продольные σ_{xy} и поперечные σ_{yy} напряжения

Диаграммы III типа свойственны еще более легированным $\alpha + \beta$-сплавам титана (ВТ16). Для них характерны две ступени превращения: при относительно малых скоростях охлаждения происходит $\beta \rightarrow \alpha$-превращение по диффузионному механизму; основная часть β-твердого раствора превращается затем по мартенситной кинетике. Начиная с некоторых критических скоростей охлаждения, сохраняется только мартенситная кинетика — бездиффузионное $\beta \rightarrow \alpha'$ превращение; при этом существенно возрастает количество остаточной β-фазы.

Диаграмма IV типа характеризует высоколегированные метастабильные β-сплавы (ВТ15). Они также претерпевают сначала диффузионное превращение, а затем мартенситное, однако при очень малых скоростях охлаждения α-фаза выделяется по границам зерен β-фазы, а α″-фаза — на внутренних участках. При более высоких скоростях охлаждения сохраняется термически метастабильная β-фаза.

Процесс старения представляет распад метастабил ьных фаз. Последовательность стадий старения и их продолжительность определяются составом сплавов, а также температурой максимального нагрева при термическом цикле сварки.

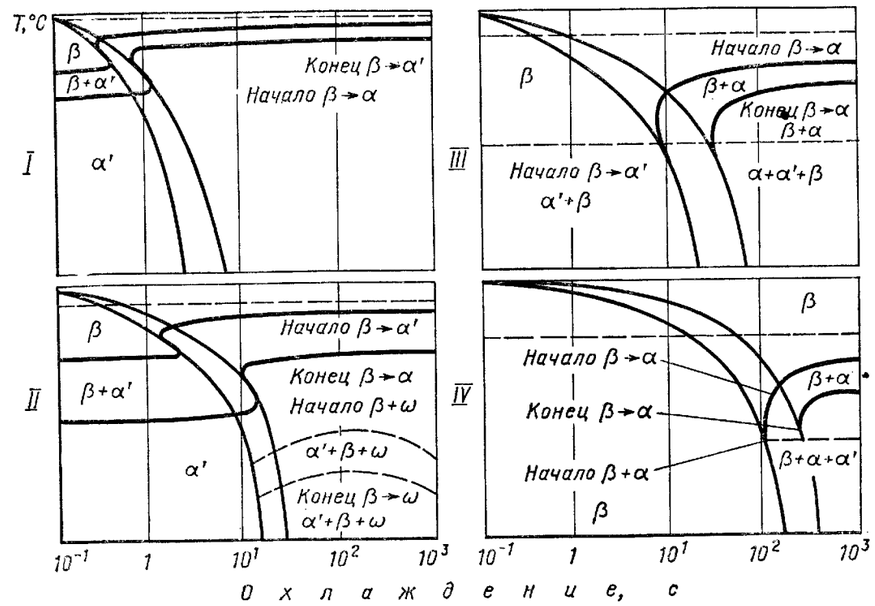


Рис. 8. Диаграммы превращений в сплавах титана в зоне полной перекристаллизации [24]

При распаде мартенситной фазы α′ первой выделяется β-фаза, мартенсит постепенно обедняется легирующим элементом и превращается в α-фазу: $\alpha'_{м} \rightarrow \alpha'_{обедн} + \beta \rightarrow \alpha + \beta$; фаза α″ распадается по другой схеме: $\alpha''_{м} \rightarrow \alpha'_{обог} + \alpha_{неравн} \rightarrow \beta_{неравн} + \alpha \rightarrow \beta + \alpha$, т. е. первой выделяется α-фаза, а мартенсит обогащается β-стабилизатором, становится термодинамически неустойчивым и превращается в неравновесную β-фазу, состав которой постепенно приближается к равновесной.

Распад метастабильной $\beta_{м}$-фазы в общем виде можно представить следующими схемами:

$$\beta_{м} \rightarrow (\omega + \beta_{обог}) \rightarrow (\omega + \beta_{обог} + \alpha) \rightarrow \beta_{ст} + \alpha;$$

$$\beta_{м} \rightarrow (\omega + \beta_{обог}) \rightarrow (\omega + \beta_{обог} + \alpha) \rightarrow \alpha + \gamma.$$

Первая схема относится к сплавам, не имеющим эвтектоидного превращения, вторая схема — к эвтектоидным системам.

Основным критерием выбора технологии сварки, исходя из оптимальных механических свойств, является оптимальный интервал скоростей охлаждения $\Delta\omega_{охл}$, в котором степень снижения уровня пластических свойств околошовной

зоны оказывается наименьшей (рис. 9). Исходя из этого сварку α- и псевдо α-сплавов целесообразно проводить при минимальных погонных энергиях (рис. 9,*а*); α + β-сплавы со средним количеством β-фазы характеризуются резким снижением пластических свойств в широком интервале скоростей охлаждения вследствие неблагоприятного сочетания фаз α′, ω и β. Вне этого интервала пластичность увеличивается при малых скоростях вследствие уменьшения количества β-фазы, при высоких — за счет ее увеличения. Эти сплавы целесообразно сваривать на мягких режимах с малыми скоростями охлаждения (рис. 9, *б*).

Высоколегированные (α + β)-сплавы с высоким содержанием β-фазы (ВТ16) или сплавы со структурой метастабильной β-фазы целесообразно сваривать на режимах, обеспечивающих среднюю и высокую скорость охлаждения (рис. 9, *в*).

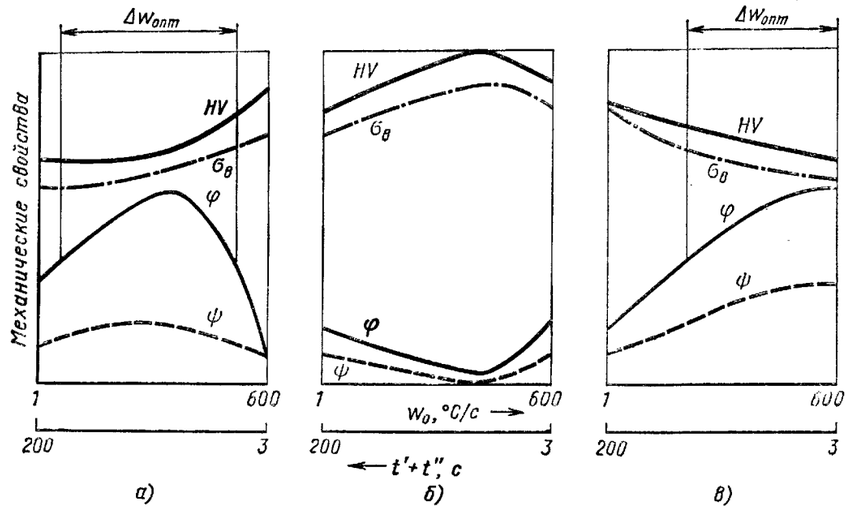


Рис. 9. Влияние длительности $t' + t''$ пребывания сплавов титана выше температуры превращений (t' на стадии нагрева; t'' — на стадии охлаждения) и последующей скорости охлаждения на механические свойства сплавов титана в околошовной зоне:

а — сплавы со структурой чистой α′-фазы или с малым количеством ω- и β-фаз (технический титан ВТ1 и ИМП1А); α-сплавы с 3,5% Al (ВТ5, ВТ5-1); α + β-сплавы (типа АТ, ОТ4, ОТ4-2, ВТ6С); *б* — сплавы со структурой α + ω + β-фаз при малом и среднем количестве β-фазы (α + β-сплавы ВТ6, ВТ14); *в* — сплавы со структурой β + α′ + α-фаз при повышенном и высоком содержании β-фазы (α + β-сплав ВТ16, метастабильный β-сплав ВТ15) [24]

Повышение пластичности с сохранением высокой прочности достигается технологическими приемами, например путем электромагнитного перемешивания расплава и применения колеблющегося электронного луча, что измельчает структуру α-фазы и уменьшает внутризеренную неоднородность. Необходимые свойства сварных соединений термоупрочняемых α + β-титановых сплавов получают после закалки и старения.

При сварке титановых сплавов у сварных соединений наблюдается склонность к замедленному разрушению, причиной которого является повышенное содержание водорода в сварном соединении в сочетании с растягивающими напряжениями первого рода (остаточными сварочными и от внешней нагрузки). Влияние водорода на склонность к трещинообразованию возрастает при увеличении содержания других примесей (кислорода и азота) и вследствие общего снижения пластичности при образовании хрупких фаз в процессе охлаждения и старения. Отрицательное влияние водорода при трещинообразовании является результатом

гидридного превращения и адсорбционного эффекта снижения прочности. Наибольшее влияние водород оказывает на α-сплавы в связи с ничтожной растворимостью в них водорода (<0,001%). Растворимость водорода в β-фазе значительно выше, поэтому сплавы, содержащие β-фазу, менее чувствительны к водородному охрупчиванию; вместе с тем повышенная растворимость водорода в β-фазе увеличивает опасность наводороживания. Склонность к растрескиванию увеличивается: а) при повышенном содержании водорода в исходном материале; б) при насыщении водородом в процессе сварки (из-за недостаточно тщательной подготовки сварочных материалов, свариваемых кромок и т. д.); в) при насыщении водородом в процессе технологической обработки сварных соединений и эксплуатации.

Радикальными мерами по борьбе с трещинообразованием являются: а) снижение газов в основном и присадочном материале: <0,008% H_2; <0,1—0,12% O_2; <0,04% N; б) соблюдение правильной технологии сварки для предотвращения попадания паров воды и вредных газов в зону сварки (тщательная подготовка и зачистка сварочных материалов и свариваемого металла, надежная защита металла в зоне сварки и рациональный подбор режимов сварки); для уменьшения склонности к замедленному разрушению целесообразно α- и псевдо α-сплавы титана сваривать на жестких режимах; α + β-сплавы — на относительно мягких (скорость охлаждения 10—20 °С/с); в) снятие остаточных сварочных напряжений; г) предотвращение возможности наводороживания сварных соединений при эксплуатации путем выбора сплавов рациональной композиции для работы в средах, где возможно насыщение водородом.

Поры в сварных соединениях, которые чаще располагаются в виде цепочки по зоне сплавления, снижают статическую и динамическую прочность сварных соединений. Их образование [18] может вызываться попаданием водорода вместе с адсорбированной влагой на присадочной проволоке, флюсе, кромках свариваемых изделий или из атмосферы при нарушении защиты. Перераспределение водорода в зоне сварки в результате термодиффузионных процессов при сварке также может привести к пористости. Растворимость водорода в титане уменьшается с повышением температуры. Поэтому в процессе сварки титана водород диффундирует от зон максимальных температур в менее нагретые области, от шва к основному металлу. Основными мерами борьбы с порами, вызванными водородом при качественном исходном материале, является тщательная подготовка сварочных материалов: прокалка флюса, применение защитного газа гарантированного качества, вакуумная дегазация и зачистка перед сваркой сварочной проволоки и свариваемых кромок (удаление альфированного слоя травлением и механической обработкой, снятие адсорбированного слоя перед сваркой щетками или шабером, обезжиривание), соблюдение защиты и технологии сварки. В сварном шве поры могут образоваться вследствие: а) задержания пузырьков инертного газа кристаллизующимся металлом сварочной ванны при сварке титана в среде защитных газов; б) «захлопывания» микрообъемов газовой фазы, локализованных на кромках стыка, при совместном деформировании кромок в процессе сварки; в) химических реакций между поверхностными загрязнениями и влагой и т. д.

При сварке титана плавлением требуются концентрированные источники тепла. Однако в связи с более низким, чем у стали, коэффициентом теплопроводности (в 4 раза), более высоким электрическим сопротивлением (в 5 раз) и меньшей теплоемкостью для сварки плавлением титана тратится меньше энергии, чем при сварке углеродистых сталей. Вследствие низких коэффициентов теплопроводности, линейного расширения и модуля упругости остаточные напряжения в сварных соединениях титана меньше предела текучести и составляют для большинства титановых сплавов (0,6÷0,8) $\sigma_{0,2}$ основного металла. Наиболее высокие остаточные напряжения возникают в сварных соединениях однофазных как α-, так и β-титановых сплавов или у слабо гетерогенизированных сплавов такого типа (рис. 10).

Высокий коэффициент поверхностного натяжения титана (около 1500 эрг/см² при температуре кристаллизации в вакууме и атмосфере гелия) в сочетании с ма-

лой вязкостью в расплавленном состоянии (с повышением температуры коэффициент вязкости изменяется от 0,89 сСт при 1730 °С до 0,37 сСт при 1920 °С) увеличивает опасность прожогов и вызывает необходимость более тщательной сборки деталей под сварку по сравнению с деталями из сталей.

Свариваемые детали разрезают механическим путем. В качестве предварительного метода разрезки с последующей механической обработкой кромок может быть использована также газовая и плазменная резка. Газовую резку титана производят на повышенной, по сравнению со сталью, скорости при одновременном снижении мощности подогревающего пламени из-за более интенсивного выделения тепла в зоне реза. Сварные соединения, выполненные непосредственно после газовой сварки, обладают низкой пластичностью и склонны к растрескиванию в условиях напряженного состояния. Удаление поверхностного слоя после газовой резки механическим путем на глубину 1 мм позволяет получить качественное сварное соединение.

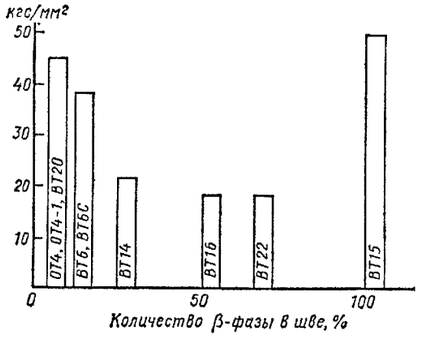


Рис. 10. Изменение максимальных растягивающих остаточных напряжений в сварных соединениях (листы толщиной 2 мм), выполненных аргонодуговой сваркой различных сплавов в зависимости от количества β-фазы (содержания β-стабилизирующего элемента) [4]

Принципиально разделка кромок при сварке титановых сплавов не отличается от разделок, применяемых для сталей. В зависимости от толщины свариваемого металла сварку производят без разделки, с V-, U-, X- и рюмкообразными разделками, а также применяют замковые соединения.

Сварку деталей из титановых сплавов производят после того, как снимут газонасыщенный (альфированный) слой. Такой обработке должны быть подвергнуты детали, изготовленные методом пластической деформации (поковки, штамповки и т. д.), а также детали, прошедшие термическую обработку в печах без защитной атмосферы. Удаление альфированного слоя с применением травителей предусматривает: а) предварительное рыхление альфированного слоя дробеструйной или пескоструйной обработкой; б) травление в растворе, содержащем 40% HF, 40% HNO_3, 20% H_2O или 50% HF и 50% HNO_3; увеличение времени травления выше оптимального (>25 с) приводит к взрыхлению поверхностных слоев металла, повышенной сорбции ингредиентов среды и увеличению порообразования при сварке; в) последующую зачистку кромок на участке шириной 10—15 мм с каждой стороны металлическими щетками или шаберами для удаления тонкого слоя металла, насыщенного водородом при травлении.

Механическое удаление альфированного слоя (зачистка шабером) непосредственно перед сваркой обеспечивает лучшие результаты.

Перед началом сборочно-сварочных работ необходимо очистить детали от загрязнений металлической щеткой и обезжирить органическим растворителем. В качестве органических растворителей можно использовать ацетон и бензин. Технология обезжиривания рекомендуется следующая: промывка свариваемых кромок и прилегающих к ним поверхностей на ширину не менее 20 мм (бязью, капроновыми или волосяными щетками) бензином марки Б-70 и последующая промывка этиловым спиртом-ректификатом или ацетоном; допускается промывка ацетоном.

При сборке конструкций из титана под сварку необходимо соблюдать следующие особенности: а) в связи с жидкотекучестью и высоким коэффициентом поверхностного натяжения расплавленного титана необходимо более высокое качество сборки; б) недопустимы правка и подгонка деталей с использованием местного

нагрева газовым пламенем; в) правка и подготовка деталей в холодном состоянии затруднена в связи со значительным пружинением титана; г) необходима надежная защита шва при сварке плавлением от доступа воздуха с обратной стороны шва при выполнении прихваток.

В качестве присадочных материалов при сварке титана плавлением используют холоднотянутую проволоку и прутки, изготовленные из листового металла. Выбор сварочной проволоки определяется условиями сварки и эксплуатации конструкций. Состав проволоки должен быть близок к составу основного металла. Сварочную проволоку из титана и его сплавов изготовляют диаметром 0,8—7 мм. Проволоку подвергают вакуумному отжигу.

При соблюдении рассмотренных требований к качеству исходного материала, подготовки под сварку, технологии сварки свариваемость сплавов титана можно характеризовать следующим образом. Высокопластичные малопрочные титановые сплавы ($\sigma_в < 70$ кгс/мм²) ОТ4-0, ОТ4-1, АТ2, а также технический титан ВТ1-00, ВТ1-0, ВТ1-1 обладают хорошей свариваемостью всеми приемлемыми для титана видами сварки; прочность и пластичность сварных соединений близка к прочности и пластичности основного металла.

Свариваемость титановых сплавов средней прочности ($\sigma_в = 75 \div 100$ кгс/мм²) различна. Сплавы ОТ4, ВТ5, ВТ5-1, 4201 (β-сплав) обладают хорошей свариваемостью различными методами; механические свойства сварных соединений также близки к механическим свойствам основного металла. Сплавы АТ3, ВТ4, АТ4, СТ5, ВТ20, ОТ4-2 обладают хорошей свариваемостью, однако прочность и пластичность сварных соединений снижаются на 5—10% по сравнению с прочностью и пластичностью основного металла. Сплав ВТ6С обладает удовлетворительной свариваемостью при сварке плавлением и контактной сварке. Предел прочности сварного соединения, выполненного сваркой плавлением, не менее 90% предела прочности основного металла.

Большинство высокопрочных сплавов обладает удовлетворительной свариваемостью. Сплавы ВТ16, ВТ23, ВТ15, ТС6 предназначены для применения в термически упрочненном состоянии, сплавы ВТ6, ВТ14, ВТ3-1 и ВТ22 — как в термически упрочненном, так и в отожженном состоянии. Оптимальные свойства сварных соединений достигаются после термической обработки.

Для титана и его сплавов, а также сварных соединений применяют в основном следующие виды термической обработки: отжиг, закалку и старение [5]. В конструкциях титановые сплавы можно использовать в состоянии после прокатки или отжига или в состоянии после упрочняющей термической обработки. Упрочнение титановых сплавов с помощью термической обработки достигается в отличие от сплавов на основе железа преимущественно за счет дисперсионного твердения и старения.

Отжиг заключается в нагреве до определенных температур, выдержке и охлаждении на воздухе для стабильных сплавов и с печью для высоколегированных. Режимы отжига приведены в табл. 4 [4, 5, 10]. Время выдержки при указанных температурах зависит от толщины обрабатываемых деталей. Для листов рекомендуют следующую выдержку:

Толщина листа, мм	⩽1,5	1,6—2,0	2,1—6,0	6
Время выдержки, мин	15	20	25	60

Время выдержки при неполном отжиге (отпуске) 20—60 мин.

Термические стабильные сплавы (титан, α- и псевдо α- сплавы) и их сварные соединения подвергают отжигу первого рода (до температур выше температуры рекристаллизации сплава) для снятия остаточных сварочных напряжений (500—600 °С, выдержка 0,5—1 ч) и для правки тонкостенных конструкций, которые для этой цели выдерживают в жестких приспособлениях при 600—650 °С в течение 0,5—1 ч.

Отжиг (α + β)-сплавов и их сварных соединений сочетает элементы отжига первого рода, основанного на рекристаллизационных процессах, и отжига второго рода, основанного на фазовой перекристаллизации. Для этих сплавов кроме про-

стого применяют рекристаллизационный отжиг. Он заключается в нагреве сплава при сравнительно высоких температурах, достаточных для прохождения рекристаллизационных процессов, охлаждении до температур, обеспечивающих высокую стабильность β-фазы (ниже температуры рекристаллизации), и выдержке при этой температуре с последующим охлаждением на воздухе.

4. Температуры полиморфного превращения, рекристаллизации, отжига и снятия остаточных сварочных напряжений (неполного отжига) промышленных титановых сплавов

Марка сплава	Температура, °С				
	полиморфного превращения	рекристаллизации		отжига листов	снятия остаточных напряжений в сварных конструкциях (неполный отжиг)
		Начало	Конец		
ВТ1-00	885—890	580	670	520—540	445—485
ВТ1-0	885—900	600	700		
ВТ5	930—980	750	850	—	550—600
ВТ5-1	950—990	580	950	700—750	
ОТ4-0	860—930	680	800	590—610	480—520
ОТ4-1	910—950	720	840	640—660	520—560
ОТ4	920—960	760	860	660—680	545—595
ВТ4	960—1000	780	900	690—710	550—650
ОТ4-2	990—1050	800	930	710—730	600—650
ВТ20			950	700—800	
АТ2	870—910	—	—	600—650	430—560
АТ3	990—1000			800—850	545—585
АТ4	950—1020			850—870	600—650
ТС5	970—1020			760—780	
ВТ6С	950—990	850	950	750—800	550—600
ВТ6	980—1010				
ВТ14	920—960	900	930	740—760	550—650
ВТ16	840—880	820	840	730—770	520—650
ВТ22		800	825	740—760	
ВТ15	750—800	500	770	790—810	550—650
ТС6	770—810	—	—		
ВТ23	880—930			740—760	

При упрочняющей термической обработке α + β-сплавов и метастабильных β-сплавов перед сваркой основной металл этих сплавов подвергают закалке или отжигу, а после сварки — закалке и старению. При расположении швов в месте утолщения возможны следующие варианты последовательности операций сварки и термической обработки: закалка — старение — сварка — местный отжиг; закалка — сварка — старение. Характерные режимы термоупрочняющей обработки приведены в табл. 5.

Дуговая сварка в среде защитных газов [4, 11, 14, 18—22, 28]. В промышленности применяют автоматическую, полуавтоматическую и ручную сварку неплавящимся электродом, непрерывно горящей и импульсной дугой и автоматическую и полуавтоматическую сварку плавящимся электродом. Для сварки титана могут быть использованы стандартное сварочное оборудование, снабженное дополнительными устройствами для защиты зоны сварки, а также специализированные

сварочные горелки и установки. Для защиты зоны дуги и расплавленной ванны необходимо использовать аргон высшего сорта (ГОСТ 10157—73). Для защиты остывающей части шва и обратной стороны шва неответственных изделий

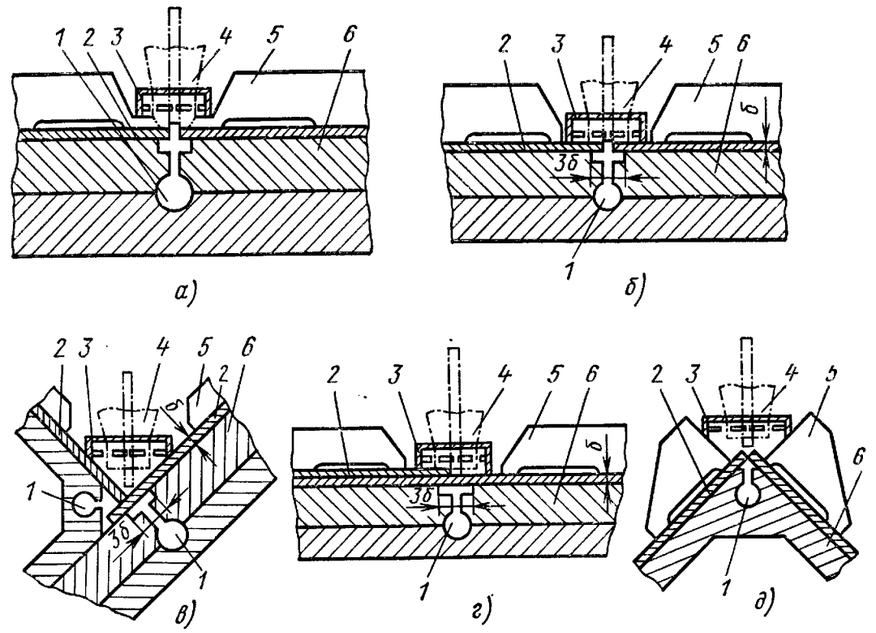


Рис. 11. Схемы защиты лицевой и обратной сторон соединения при механизированной аргонодуговой сварке титана и его сплавов; соединения:

а — стыковое листов большой толщины (св. 3 мм); *б* — стыковое листов малой толщины (до 3 мм); *в* — тавровое; *г* — нахлесточное; *д* — угловое; *1* — канал для аргона, сообщающийся с канавкой в подкладке; *2* — свариваемые листы титана; *3* — защитная приставка; *4* — сопло сварочной горелки; *5* — прижимы приспособления; *6* — приспособления

допускается использовать аргон 2-го сорта. Гелий и его смеси с аргоном целесообразно использовать при дуговой сварке плавящимся электродом больших толщин (8—10 мм). При сварке в гелии необходимый для защиты сварочной ванны расход газа в 2—3 раза больше, напряжение на дуге в 1,4—1,6 раза выше, а ширина зоны расплавления в 1,4 больше, чем при сварке в аргоне.

5. Характерные режимы термоупрочняющей обработки сварных соединений

Сплав	Температура, °С		Время выдержки при старении, ч	$\sigma_в$, кгс/мм²	δ, %	$a_н$, кгс·м/см²
	закалки	старения				
ВТ6С	950	475	22	120	—	3
ВТ14	880—900	480—500	8—12	125	13	4,5

Защита зоны сварки может быть местной и общей. При местной защите защищается зона металла, нагретого до температур начала активного поглощения газов, ограниченная изотермой 350—400 °С, с лицевой и обратной стороны шва. На рис. 11—13 приведены конструктивные схемы защиты при сварке различных

соединений из титана и других активных металлов. Общая защита сварного соединения и изделия в целом осуществляется при сварке в камерах с контролируемой атмосферой и в специализированных боксах с обеспечением в них условий для работы сварщиков. Камеры вакуумируются до 10^{-2}—10^{-4} мм рт.ст., после чего их заполняют инертным газом с избыточным давлением 0,1—0,3 кгс/см². Основное требование, предъявляемое к камерам с контролируемой атмосферой, — возможность создания и поддержания в процессе сварки заданной чистоты инертной среды. Последнее реализуется использованием газовой очистки в процессе сварки по замкнутому циклу: камера — компрессор — система химической очистки — камера. При наличии примесей в атмосфере камеры не выше их содержания в аргоне высшего сорта обеспечиваются необходимые пластичность, прочность и коррозионная стойкость металла сварных соединений.

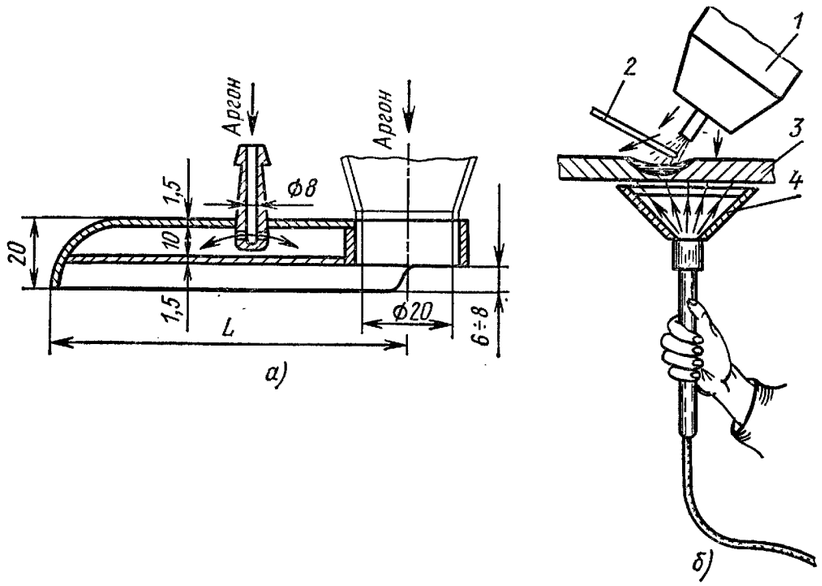


Рис. 12. Продольный разрез защитной приставки колпака (*а*) и простейшая схема защиты обратной стороны шва при ручной аргонодуговой сварке (*б*):

1 — сопло горелки; *2* — присадочная проволока; *3* — изделие; *4* — приспособление для защиты обратной стороны соединения

Местные защитные камеры используют с вакуумированием и без предварительного вакуумирования. В последнем случае для вытеснения воздуха и качественной защиты необходима продувка камеры 5—10-кратным объемом инертного газа. Улучшение условий защиты металла, нагретого до температур активного поглощения газов, достигается применением мер, обеспечивающих интенсивный теплоотвод из зоны сварки (медные водоохлаждаемые подкладки и накладки, охлаждающие ванны) и предупреждающих контакт нагретой поверхности с воздухом (подкладки, накладки, покрытия и т. д.).

Аргонодуговую сварку непрерывно горящей дугой производят на постоянном токе прямой полярности от стандартных источников питания. При толщине металла до 3—4 мм сварку выполняют за один проход, при большей толщине требуется многопроходная сварка (табл. 6—10). Увеличение глубины проплавления и производительности сварки достигается при использовании способа сварки проникающей (заглубленной) дугой при принудительном погружении дуги ниже

поверхности свариваемых кромок. Таким способом можно сваривать металл толщиной до 10 мм без применения разделки кромок и присадочного металла.

Применение фтористых флюсов при аргонодуговой сварке титановых сплавов позволяет снизить погонную энергию по сравнению с аргонодуговой сваркой без флюса, сузить зону термического влияния, уменьшить пористость швов и улучшить

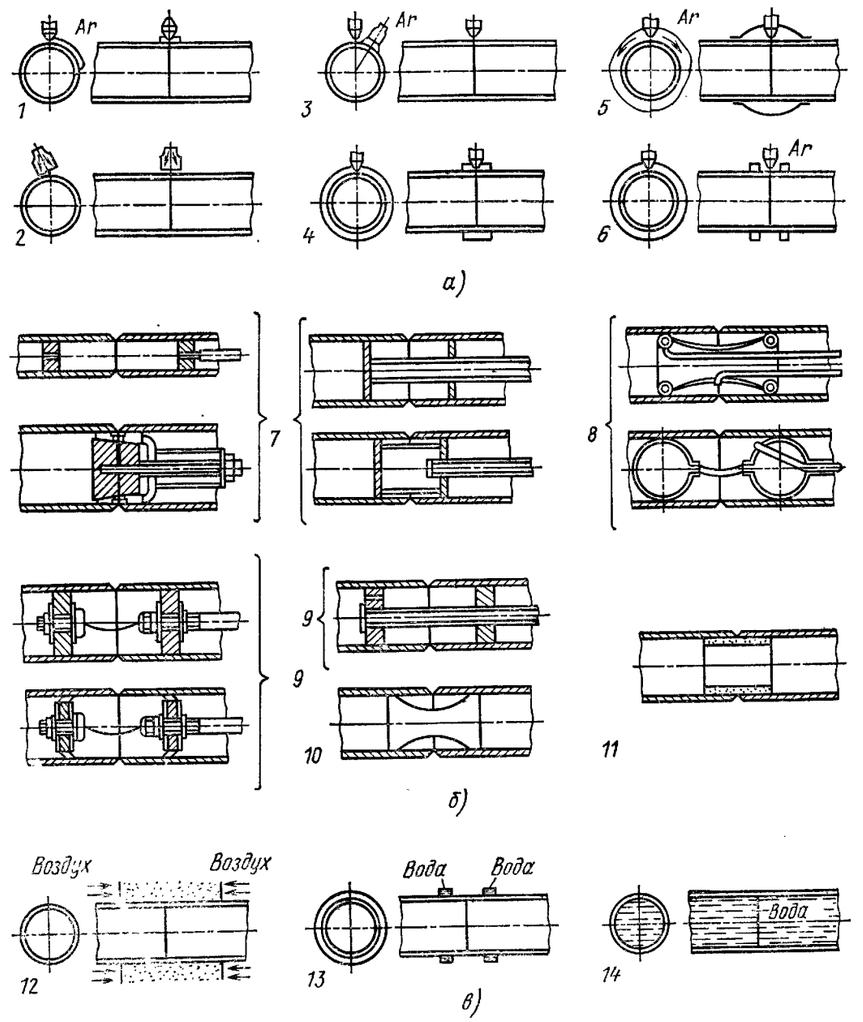


Рис. 13. Конструктивные схемы защиты при аргонодуговой сварке труб из титана и других активных металлов:

а — защита наружной стороны стыка; *б* — защита обратной стороны шва при сварке стыков; *в* — дополнительные способы улучшения защиты; *1* — газозащитная приставка; *2* — горелка с уширенным ламинарным потоком; *3* — горелка с дополнительным поддувом; *4* — дополнительная микрокамера; *5* — эластичная камера; *6* — боковой поддув; *7* — жесткие устройства; *8* — мягкие устройства; *9* — полужесткие устройства; *10* — защитные карманы; *11* — специальные обмазки; *12* — ограждения палаточного типа; *13* — охлаждение кольцевыми накладками; *14* — охлаждение проточной водой или распылением с внутренней стороны шва

6. Ориентировочные режимы ручной аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом стыковых соединений титана и его сплавов

Толщина материала, мм	Диаметр, мм		Сварочный ток, А	Расход аргона для защиты, л/мин		Число проходов
	вольфрамового электрода	присадочной проволоки		дуги	обратной стороны шва	
0,5 0,8	1,5	1,0—1,5	15—20 30—50	6—8	2—3	1
1,0 1,2	1,5—2,0		40—60 50—60			
1,5 1,8		1,5—2,0	60—80	8—10		
2,0 2,5	2,0—2,5		70—100 100—130			
3,0	2,5—3,0		120—160	10—12	2—4	2
4,0 5,0			130—140			2—3
6,0 7,0 10,0			140—150 150—170			2—4 4—5 11—15

7. Режимы ручной аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом с присадочной проволокой труб из титана

Толщина стенки трубы	Диаметр проволоки	Диаметр вольфрамового электрода	Вылет электрода из сопла	Сварочный ток, А		Расход аргона, л/мин		
				Первый шов	Последующие швы	в горелку	в приставку	внутри трубы
мм								
2	Без присадки 1,4—2,0	2—4	5—8	70—90 —	— 110—120	6—8	6—8	4—5
3	Без присадки 1,2—1,6			90—100 —	— 110—120			
4	Без присадки 2—3		6—10	110—120 —	— 130—140			
5—6	Без присадки 2—3			110—120 —	— 130—140			
7—9	Без присадки 2—3			170 —	— 210—240			6—8
10—12	Без присадки 3—4		6—12	190 —	— 220—250	8—10	8—10	
13—16	Без присадки 4—5	4		190 —	— 220—250			

8. Режимы полуавтоматической аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом

Толщина, мм	Положение в пространстве	Диаметр присадочной проволоки, мм	Сварочный ток, А		Скорость подачи присадочной проволоки, м/ч	
			Корневой шов	Заполнение разделки и усиление шва	Корневой шов	Заполнение разделки и усиление шва
Стыковое соединение						
4—5	Н П В Г	1,6 2,0 1,6 2,0	160—200 280—330 160—200 250—300	—	60—80 70—100 60—80 60—90	—
6—7	Н П В Г	1,6 2,0 1,6 2,0	220—270 300—350 200—250 280—330	230—280 330—380 200—250 300—350	80—100 80—110 70—90 70—100	90—110 90—120 70—90 80—110
8—12	Н П В Г	1,6 2,0 1,6 2,0	230—280 300—350 200—250 300—350	280—330 350—400 250—300 300—350	85—110 90—120 80—100 80—110	100—140 100—160 90—120 90—140
Тавровое соединение						
4—5	Н П В Г	1,6 2,0 1,6 2,0	160—200 200—250 140—180 200—250	—	60—80	—
6—7	Н П В Г	1,6 2,0 1,6 2,0	200—250 230—270 200—250 220—270	230—280 300—350 230—260 280—330	70—100 65—90 65—90 65—90	75—110 70—120 70—100 70—120
8—12	Н П	1,6 2,0	220—270 250—300	300—350 350—400	70—100	100—160
	В Г	1,6 2,0	220—270 250—300	280—330 320—370		90—120

Примечание. Положение электрода в пространстве: Н — нижнее; П — потолочное; В — вертикальное; Г — горизонтальное

9. Производительность наплавки при ручной и полуавтоматической аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом с использованием присадочного металла

Толщина, мм	Ручная сварка			Полуавтоматическая сварка		
	Диаметр прутка, мм	Сварочный ток, А	Производительность наплавки, кг/ч	Диаметр проволоки, мм	Сварочный ток, А	Производительность наплавки, кг/ч
4—5	3	140—180	0,32—0,45	1,6	200—250	0,8—1,0
6—9	4	230—270	0,68—0,80	2,0	280—350	0,99—1,41
10	5	270—350	0,93—1,33	2,0	320—400	1,28—2,3

условия защиты металла от взаимодействия с воздухом. Используются флюсы систем АНТ, фтористые соединения щелочных и щелочноземельных металлов. Флюс разводят этиловым спиртом до получения жидкой пасты (30 г флюса и 100 г спирта), которую наносят на кромки свариваемых деталей. Сварку производят после улетучивания спирта.

10. Ориентировочные режимы механизированной аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом стыковых соединений титана и его сплавов

Толщина материала, мм	Диаметр, мм: вольфрамового электрода	Диаметр, мм: присадочной проволоки	Сварочный ток, А	Скорость сварки, м/ч	Установочная длина дуги, мм	Расход аргона для защиты, л/мин: дуги	Расход аргона для защиты, л/мин: остывающего шва	Расход аргона для защиты, л/мин: обратной стороны шва
Без присадочного материала								
0,8	1,5	—	40—80	20—40	1,0—1,2	6—8	3—5	2—3
1,0			65—100	25—40				
1,2			70—120					
1,5	1,5—2,0		70—140					
1,8			80—140		1,2—1,5	6—9		
2,0			100—150					
2,5	2,0—2,5		140—200	25—30	1,5—2,0	7—10	5—7	3—4
3,0	2,5—3,0		180—200					
С присадочным материалом								
1,0	1,5—2,0	1,5	80—120	25—40	1,5—1,7	5—8	3—5	2—3
1,2			100—140					
1,5	2,0		140—180		1,7—2,0			
2,0	2,0—2,5		180—200	25—28	2,0—2,2			
3,0	2,5—3,0	1,5—2,0	200—260	22—25		7—10	5—7	
4,0				15—20	—	10—12		
10,0								

11. Режимы автоматической аргонодуговой импульсной сварки вольфрамовым электродом

Толщина металла, мм	Ток, А: сварочный	Ток, А: дежурной дуги	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Длительность, с: импульса	Длительность, с: паузы	Установочная длина дуги, мм	Диаметр электрода, мм	Расход аргона для защиты дуги и шва, л/мин
0,8	55—80	4—5	10—11	18—25	0,1—0,2	0,2—0,3	1,2	1,5—2	5—7
1	66—100				0,14—0,2	0,2—0,34			
1,5	120—170	4—6	11—12	16—24	0,16—0,24	0,2—0,36	1,2—1,5	2,2—8	6—8
2	160—210	6—8		14—22				2,5—8	

Для тонколистового металла (≤2,5 мм) целесообразно применять импульсную сварку (табл. 11) без присадочной проволоки. Разработана плазменная сварка (табл. 12) листов титана малой (0,025—0,5 мм) и средней (0,5—12,5 мм) толщины и многослойная сварка плоских листов (толщиной св. 12 мм). По сравнению с аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом плазменная сварка характеризуется более высокой производительностью, меньшим короблением (деформация на $^1/_2$—$^1/_3$ меньше). Механические свойства титана при плазменной сварке близки к свойствам, полученным при аргонодуговой сварке. Основной трудностью при плазменной сварке по сравнению с аргонодуговой являются более жесткие требования к качеству сборки в связи с характерным грибообразным проплавлением. Процесс сварки тонколистового металла лучше осуществлять внутри микрокамер. Благодаря этому обеспечивается надежная защита зоны сварки при малом расходе инертного газа. При высоком качестве основного и присадочного материала, соблюдении условий защиты и оптимальных режимах сварки вольфрамовым электродом механические свойства сварных соединений титана и его сплавов (табл. 13) близки к свойствам основного металла. Лучшие свойства достигаются при автоматизированных методах сварки.

12. Режимы сварки сжатой дугой сплава ОТ4 (стыковое соединение)

Толщина материала	Диаметр сопла	Ток, А	Скорость сварки, м/ч	Расход газа, л/мин: плазмообразующего	Расход газа, л/мин: защитного
мм					
0,6	2,0	40—45	22—30	0,5	3—4
2,0	3,0	80—85	20—22	0,5	
10,0	5,0	280	12	3,0	
16,0	5,0	300	12	4,0	

13. Механические свойства основного металла и сварных соединений, выполненных автоматической аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом без присадочного материала

Сплав	Толщина, мм	Основной металл: $\sigma_в$, гс/мм²	Основной металл: δ, %	Основной металл: α°	Сварные соединения: $\sigma_в$, кгс/мм²	Сварные соединения: α°
ВТ1-1	2	52	32	180	60,1	170—180
ОТ4	1,5	80—85	26—28	85—88	80—85	50—56
ОТ4-1	1,2	64—69	32—34	107—108	67—68	91—104
ОТ4-2	1,5	110—112	13—16	40—42	110—112	34—41
ВТ5-1	2,0	81—91	18—19	56	87—88	49—60
ВТ6	1,0	106	24	76	106	48—57

Сварку плавящимся электродом в среде инертных газов применяют для стыковых, тавровых и нахлесточных соединений из металла толщиной более 4 мм в нижнем положении. Сварку следует производить при обратной полярности на режимах, гарантирующих струйный перенос металла (табл. 14). При сварке в аргоне наблюдается меньшее разбрызгивание металла; больше глубина проплавления, меньше ширина шва и площадь проплавления, чем при сварке в гелии. Однако форма зоны проплавления при сварке в гелии более благоприятна, чем в аргоне. Лучшее формирование шва и стабильность процесса достигаются при использовании смеси из 80% гелия и 20% аргона. При полуавтоматической сварке применяют проволоку диаметром до 2 мм. При автоматизированной сварке стыковых и угловых соединений используют проволоку диаметром 2—5 мм. Способы защиты, материалы, приборы, сварочная оснастка в основном те же, что и при сварке вольфрамовым электродом. Механические свойства приведены в табл. 15.

14. Режимы сварки титана плавящимся электродом в среде защитных газов

Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Вылет электрода, мм	Расход газа, л/мин	Толщина стыковых соединений, свариваемых без разделки кромок, мм
0,6—0,8	150—250	28—32 22—24	30—40	10—14 10—14	30—40 20—30	4—6 4—8
1,0—1,2	280—320	32—36 24—28	30—40	17—20 17—20	35—45 25—35	4—8 5—10
1,6—2,0	340—520	38—40 30—34	20—25	20—25 20—25	70—90 35—45	5—10 8—12
3,0	480—750	42—48 32—34	18—22	30—35 30—35	80—100 40—50	10—28 14—34
4,0	630—929	46—50 32—36	16—18	40—50 35—40	100—120 50—60	12—32 16—36
5,0	780—1200	46—52 34—38	14—16	45—55 40—45	100—120 50—60	12—32 16—36

Примечание. Числитель — при защите в гелии, знаменатель — при защите в аргоне.

15. Механические свойства сварных соединений титана и титановых сплавов больших толщин, выполненных аргонодуговой сваркой *1

Сплав	Толщина металла, мм	Присадка	Состояние	Метод сварки *2	$\sigma_в$, кгс/мм²	$a_н$ *3, кгс·м/см²		Статическая выносливость при $\sigma = 0{,}7\sigma_в$, тыс. циклов
ОТ4	20	ВТ1-0	После сварки	П Н	71 68	7,0 8,5	5,0 5,5	45 50
ВТ14	15	СПТ-2*4	Отожженное	П Н	95 92	4,0 4,5	3,5 4,0	55 85
ВТ20		ВТ20-2св*5		П Н	95 90	4,0 4,5	3,5 4,0	50 100
ВТ22		СПТ-2		П Н	100 95	4,0 4,5	3,5 3,5	41,5 100

*1 Сварка неплавящимся электродом производилась с использованием присадочного металла.
*2 Метод сварки: П — плавящимся электродом; Н — неплавящимся электродом.
*3 По переходной зоне.
*4 4% Ti; 1,5% Al; Zr 3% V.
*5 3,5% Ti; 1% Al; 1% Zr; Mo 1% V.

Сварка под флюсом [14, 18, 20]. Основным преимуществом сварки титана под флюсом является высокая производительность процесса. Этим способом можно выполнять стыковые, угловые и нахлесточные швы при толщине металла 3 мм и больше. Защиту обратной стороны шва осуществляют применением остающейся или флюсомедной подкладки или флюсовой подушки. Сварку можно производить с использованием стандартной сварочной аппаратуры; ток постоянный обратной полярности. Применяют бескислородные флюсы АН-Т1; АН-Т3, АН-Т5, АН-Т7

системы CaF_2 — BCl_2 — NaF. Флюс перед употреблением необходимо высушить при 200—300°С. Содержание влаги во флюсе не должно превышать 0,05%. Высота слоя флюса должна быть не меньше вылета электрода. Вылет электродной проволоки следует ограничивать более строго, чем при дуговой сварке в среде инертных газов, во избежание перегрева проволоки, загрязнения металла шва газами и ухудшения стабильности процесса. Режимы сварки приведены в табл. 16. Для автоматической сварки титана больших толщин (св. 15 мм) рекомендуется сварка на более высоких плотностях тока и применение двухдуговой сварки.

В связи с особыми физико-химическими свойствами титановой электродной проволоки к полуавтоматам для сварки титана предъявляют следующие требования: конструкция наконечника должна обеспечить стабильность токопровода на небольшом вылете; из-за сравнительно большой жесткости титановой проволоки необходим небольшой изгиб направляющей трубки держателя; в связи с высоким коэффициентом трения титана целесообразно применять более мощные подающие механизмы. Для полуавтоматической сварки титана используют полуавтоматы толкающего (А-732) и тянущего (ПШЛ-10) типов. Режимы сварки приведены в табл. 17. Автоматическая и полуавтоматическая сварка под флюсом позволяет получать высокие свойства сварных соединений и металла шва (табл. 18).

16. Режимы автоматической сварки под флюсом стыковых соединений титана

Толщина металла, мм	Шов	Диаметр электрода, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость, м/ч	
					подачи электродной проволоки	сварки
2,5	Односторонний на остающейся подкладке	2	180—200	30—32	160—165	50
3	То же	2,5	240—260		185—190	
4	»		270—290			
5	Одностороний на медиой подкладке	3	370—390		150—155	
6	То же		390—420		170—175	
8	»	4	540—600	32—34	45—100	45
	Двустороний	3	310—330	30—32	135—140	50
10	Односторонний на медиой подкладке	4	600—620	32—34	110—115	45
	Двусторонний	3	340—360	30—32	150—155	50
12	»		350—400		160—165	
15	»		390—420		175—180	

17. Режимы полуавтоматической сварки титана под флюсом

Шов	Скорость подачи электродной проволоки, м/ч	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В
Двусторонний стыковой, толщина металла 6—8 мм	162—189	200—250	32—34
Нахлесточный, толщина металла 6—8 мм	215	250—280	32—34
Угловой сечением 8×8 мм	230	280—300	34—36

Примечание. Диаметр электродной проволоки 2 мм; вылет электрода 14—16 мм.

18. Механические свойства сварного соединения при сварке под флюсом сплава ОТ4

Метод сварки	$\sigma_в$	σ_{02}	δ	ψ	$\alpha°$
	кгс/мм²		%		
Автоматическая	81,1	74,4	15,2	31,8	82
Полуавтоматическая	80,6	75,1	17,2	32,6	79

Электрошлаковую сварку титана [18, 26] применяют для соединений заготовок (поковок) и деталей толщиной свыше 40 мм. Сварку производят пластинчатым электродом [плотность тока 2,0—2,5 А/мм²; напряжение 13—17 В; толщина электродов (поковка, прокат) 9—18 мм; глубина шлаковой ванны 20—30 мм; зазор между кромками 24—28 мм], электродными проволоками (диаметром 3—5 мм) и плавящимся мундштуком. Используется специализированная (сварочные головки А-977, А-1494, устройство А-1022 и др.) и стандартная аппаратура, переоборудованная применительно к сварке титана. Расплавленный основной и присадочный металл защищают тугоплавкими фторидными флюсами типа АНТ2, АНТ4, АНТ6 и дополнительно аргоном высшего сорта. Сварку производят переменным током с минимальной погонной энергией, обеспечивающей устойчивый электрошлаковый процесс и необходимое проплавление свариваемых кромок. Используют источники типа ТПК-1000-3, ТПК-3000-1, ТПК-3000-3 с жесткой вольт-амперной характеристикой. Ориентировочные режимы сварки приведены в табл. 19 и 20. Механические свойства сварных соединений близки к свойствам основного металла (табл. 21). Недостаток сварки — крупнозернистая макро- и микроструктура, вызывающая понижение пластических свойств. Улучшение свойств достигается термической обработкой. Техника и технология сварки сплавов принципиально не отличаются от сварки технического титана.

19. Режимы электрошлаковой сварки титановыми проволочными электродами диаметром 5 мм

Режим сварки	Толщина основного металла, мм					
	40—60	60—80	80—100	100—120	120—140	140—160
Напряжение, В	26—28 / 26—28	28—30 / 28—30	30—32 / 30—32	28—30 / 28—30	30—32 / 30—32	32—34 / 32—34
Сварочный ток, А	760—830 / 1470—1540			1520—1660 / 2940—3080		
Скорость, м/ч	1,2—1,7 / 4,8—6,8	0,9—1,2 / 3,6—4,8	0,7—0,9 / 2,8—3,6	0,6—0,7 / 2,4—2,8	1,2—1,5 / 4,8—6,0	1,1—1,2 / 4,4—4,8	0,9—1,1 / 3,6—4,4
Число электродов, шт	1				2	
Скорость колебания электрода, м/ч	—	30 / 20			—	
Расстояние между электродами, мм	—				75—95 / 80—100	95—115 / 100—120	115—135 / 120—140

Примечания: 1. В числителе приведены режимы при скорости подачи электрода $v = 120$ м/ч, в знаменателе — при $v = 480$ м/ч.
2. Глубина шлаковой ванны $l = 30 \div 40$ мм и расход аргона $Q = 45$ л/мин при скорости подачи электрода $v = 120$ м/ч; $l = 40 \div 50$ мм и $Q = 50$ л/мин при $v = 480$ м/ч.
3. Сухой вылет электрода 40—60 мм; зазор между кромками 30—32 мм.

20. Оптимальные режимы электрошлаковой сварки титановым плавящимся мундштуком

Толщина основного металла, мм	Напряжение, В	Зазор между кромками, мм	Число электродов, шт.	Скорость, м/ч		Сварочный ток, А	Расход аргона, л/мин
				подачи электродов	сварки		
100	19	18	1	120	1,2	2510	25
110	19	16	2	85	1,4	2980	25
200	20	15	2	160	1,6	4760	35
220	20	16	3	105	1,5	5430	40
250	21	16	3	130	1,6	6210	40
300	21	16	3	150	1,6	7590	45
350	22	18	3	120	1,7	9260	50
400	22	18	4	145	1,7	10970	55

Электронно-лучевая сварка титана [14, 18—22, 28] обеспечивает наилучшие условия защиты металла от газов. Высокая концентрация тепловой энергии позволяет вести сварку на высоких скоростях при малой энергоемкости процесса и получать сварные соединения титана с малой шириной шва и зоны термического влияния. Металл шва имеет мелкозернистую структуру. Необходимым условием получения качественных сварных соединений является точная сборка под сварку. Режимы электронно-лучевой сварки титана зависят от типа используемой электронной пушки, технологической оснастки, толщины металла, конфигурации и размеров изделия.

21. Механические свойства сварных соединений, выполненных электрошлаковой сваркой (после отжига)

Сплав	$\sigma_в$, кгс/мм²	$a_н$, кгс·м/см²	Статическая выносливость при $\sigma = 0{,}7\,\sigma_в$, тыс. циклов
ОТ4	68	10	80
ВТ22	98	5	150

Рекомендуемые режимы электронно-лучевой сварки стыковых соединений из сплавов ВТ20, ВТ22, ВТ23 толщиной 8—15 мм в нижнем положении на остающейся массивной технологической подкладке: $U = 30$ кВ; $I_{св} = 110 \div 180$ мкА, $v_{св} = 25 \div 35$ м/ч.

Дуговую сварку в вакууме [18] можно применять для сварки титана толщиной 2—60 мм проволоками диаметром 1,5—5,0 мм. Сварку плавящимся электродом производят на постоянном токе обратной полярности специализированными сварочными головками в вакуумных камерах. Основным преимуществом вакуумно-дуговой сварки является повышение пластичности сварных соединений по сравнению с другими методами сварки и с основным металлом. Это объясняется дополнительной очисткой металла шва при сварке и уменьшением в нем газов и неметаллических включений при расплавлении металла в вакууме. По этой же причине несколько уменьшены пределы прочности и текучести металла шва. Примерный режим сварки титана толщиной 50 мм с V-образной разделкой электродом диаметром 3 мм при поперечных колебаниях: сварочный ток 380—400 А; напряжение дуги 29—30 В; скорость сварки 15 м/ч; число проходов 6; вакуум при сварке $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.

Сварка в вакууме полым неплавящимся электродом (полым катодом) отличается высокой концентрацией энергии и по проплавляющей способности занимает промежуточное положение между сваркой плазмой и сваркой электронным лучом. Возможность ведения процесса в глубоком вакууме (10^{-3}—10^{-5} мм рт.ст.) позволяет получать высококачественную защиту сварочной ванны и осуществлять сварку титана, циркония, ниобия, тантала, молибдена и их сплавов. При сварке в горелку подается аргон в количестве 0,5—2,0 л/ч, что позволяет экономить инертный газ.

Контактная сварка [18, 28] обеспечивает получение качественных сварных соединений титановых сплавов при соблюдении технологии. Рекомендуемая подготовка свариваемых участков: удаление загрязнений ацетоном, протирка ветошью, обработка в травителе (состава типа 30% HNO_3, 3% HF, 67% H_2O), промывка в воде не менее 5 мин, обезжиривание, обезвоживание ацетоном и протирка. В случае точечной сварки защита инертным газом не требуется благодаря плотному контакту и сжатию свариваемых деталей. Однако для шовной сварки и стыковой сопротивлением необходимо применять дополнительную защиту аргоном первого сорта. Благодаря высокому электрическому сопротивлению и малой теплопроводности титана контактная сварка последнего значительно облегчается и может выполняться на различных машинах средней мощности одно- и трехфазного переменного или постоянного тока. Титан по сравнению со сталями менее чувствителен к усилию на электродах и их геометрическим параметрам. Низкая электропроводность титановых сплавов облегчает возможность многоэлектродной сварки. Параметры режима сварки чистого титана близки к параметрам режимов, используемых для коррозионно-стойких сталей. Ориентировочные режимы приведены в табл. 22—24, а механические свойства — в табл. 25.

22. Ориентировочные режимы контактной точечной сварки титана

Толщина листов, мм	Радиус сферы электродов, мм (± 10%)	Сварочный ток, кА	Время сварки, с (± 10%)	Усилие на электродах, кгс	Диаметр ядра точки, мм	Максимальная прочность на срез, кгс
0,8 + 0,8	50	5,0—6,0	0,15	200—250	4—5	600
1,0 + 1,0	75	6,0—7,0	0,20	250—300	5—6	700
1,2 + 1,2		6,5—7,5	0,22	300—350	5,5—6,5	900
1,5 + 1,5	100	8,0—8,5	0,24	400—500	6,5—7,0	1100
2,0 + 2,0		9,5—10,0	0,28	500—600	7,0—8,0	1500
2,5 + 2,5	150	11,0—12,0	0,35	600—700	8,0—9,0	1650

23. Ориентировочные режимы контактной шовной сварки титана

Толщина листов, мм	Радиус сферы роликов, мм	Ширина плоских роликов, мм	Сварочный ток, кА	Длительность, с		Усилие на роликах, кгс	Скорость сварки, м/мин	Ширина шва, мм
				сварочного импульса	паузы			
0,8 + 0,8	60	4,5	6,0—7,0	0,10	0,18	200—250	0,8	3—4
1,0 + 1,0	75		7,0—8,0	0,12	0,25	250—350	0,7	4—5
1,2 + 1,2		6,5	8,0—9,0	0,16	0,30	350—400		5—6
1,5 + 1,5	100		8,5—9,5	0,20	0,40	400—500	0,6	6—6,5
2,0 + 2,0		7,5	11,0—12,0	0,25	0,50			7—7,5

Сварка титана давлением [8, 9, 15, 16, 18, 28]. **Диффузионную сварку титана** производят в вакууме $1 \cdot 10^{-3} \div 10^{-4}$ мм рт. ст. при 800—1100°С, давлении 0,2—1 кгс/мм² (в зависимости от площади образца) и длительности нагрева 1—10 мин (в зависимости от температуры).

Хорошее качество соединения получено, например, при режимах, указанных в табл. 26.

24. Ориентировочные режимы контактной стыковой сварки титана оплавлением

Поперечное сечение, мм	Припуск, мм		Сварочный ток при оплавлении, А	Время, с	
	на оплавление	на осадку		подогрева	оплавления
1000	10	8	29 500	120	3
2000				180	
2500			31 200	300	4
3000	15	10	33 000	360	
3500				420	5
4000				430	6

Примечание. Сварочный ток при подогреве 22 500 А, усилие при осадке 5000 кгс.

25. Механические свойства сварной точки при сварке листов из различных титановых сплавов

Сплав	Толщина листов, мм	Состояние	Несущая способность сварной точки, кгс		Сплав	Толщина листов, мм	Состояние	Несущая способность сварной точки, кгс	
			на срез	на отрыв				на срез	на отрыв
ВТ1-0	1,5+1,5	После сварки	1000	320	ВТ5-1	1,0+1,0	После сварки	970	—
						1,5+1,5		1250	380
						2,0+2,0		1660	—
ОТ4-1	1,0+1,0		850	—					
	1,5+1,5		1200	360	ВТ20	1,0+1,0		1090	—
	2,0+2,0		1550	—		1,5+1,5		1250	410
						2,0+2,0		1650	—
ОТ4	1,0+1,0		950	—					
	1,5+1,5		1300	400	ВТ14	1,5+1,5	После сварки (отожженное)	1500	430
	2,0+2,0		1650	—		1,5+1,5	После сварки (закаленное и состаренное)	1560	480
ВТ4	1,0+1,0		1000	—					
	1,5+1,5		1300	420					
	2,0+2,0		1700	—					
ОТ4-2	1,0+1,0		1100	—	ВТ22	1,5+1,5	После сварки	1650	450
	1,5+1,5		1350	400		1,5+1,5	После сварки и отжига	1660	430
	2,0+2,0		1800	—					

Значения $\sigma_в$, σ_{-1} и δ сварных соединений такие же, как и у основного металла. Для облегчения соединения при диффузионной сварке применяют промежуточные однослойные и многослойные покрытия и прокладки из более легкоплавких металлов, образующих относительно низкотемпературные эвтектики непосредственно с титаном (Ti—Me—Ti, однослойное покрытие) или между разнородными металлами (Ti—Me_1—Me_2—Ti), образующими покрытие. Соединение деталей из титановых сплавов диффузионной сваркой через промежуточную медную прокладку основано на использовании медно-титановой эвтектики, образующейся в зоне контакта при 870—890 °С (ниже температуры сварки). Для улучшения механичес-

ких свойств соединений после сварки следует применять изотермический отжиг, который снижает содержание меди в шве. В качестве промежуточной прокладки можно использовать медную фольгу или напыленный слой меди. Оптимальными режимами процесса получения качественных соединений из титановых сплавов ВТ6 и ВТ16 через медную прокладку (толщиной $\delta = 5 \div 20$ мкм) являются [15]: 1) сварка — температура 900 °С; давление 0,5—1 кгс/мм²; время 5 мин; 2) изотермический отжиг — температура 900 °С; время 1—2 ч. Применять промежуточную прокладку целесообразно при сварке геометрически сложных титановых конструкций с поверхностями большой протяженности. При получении соединений при сварке давлением в жидкой среде в качестве теплоносителя можно использовать жидкие среды на основе расплавленных солей. При сварке титановых сплавов теплоносителем может служить смесь солей состава: 70% $BaCl_2$+30% KCl [8]. Оптимальные режимы сварки титановых сплавов приведены в табл. 27.

26. Режимы диффузионной сварки

Сплав	T, °С	p, кгс/мм²	t, мин
Технический титан	800	0,75	7
ВТ5-1	1000	0,5	5—10

27. Оптимальные режимы сварки титановых сплавов

Сплав	T, °С	p, кгс/мм²	t, мин
ОТ4	950	0,5	10
ВТ6	950	1	15

28. Оптимальные режимы сварки в условиях сверхпластичности

Сплавы	T, °С	Скорость деформации, 1/с	t, мин
ВТ6 + ВТ6	900	$7{,}5 \cdot 10^{-4}$	3,2
ОТ4 + ОТ4			1,2
ОТ4 + ВТ15	920	$2 \cdot 10^{-3}$	10

Применять сварку давлением в жидкой среде целесообразно при изготовлении сварных изделий из титановых сплавов в мелкосерийном производстве.

Сварка в режиме сверхпластичности [16] по сравнению с обычной сваркой постоянным давлением с подогревом позволяет в 4 раза снизить необходимое усилие, в 6—30 раз длительность сварки и на 50—150 °С температуру (табл. 28).

Сварка циркония и гафния

Цирконий и гафний являются аналогами титана по химическим свойствам и свариваемости [3, 6, 7, 10, 18, 20, 28]. По зарубежным данным цирконий обладает малым сечением захвата нейтронов (0,18 барн), хорошей коррозионной стойкостью и прочностью, поэтому сплавы на его основе используют как конструкционный материал для технологических трубопроводов, ТВЭЛов и других деталей в ядерных энергетических установках на медленных нейтронах. Гафний, обладающий большим сечением захвата нейтронов (105 барн) и исключительной коррозионной стойкостью в воде и паре, применяется для контролирующих стержней в водоохлаждаемых реакторах [28].

Фазовые превращения в цирконии и гафнии и диаграммы состояния с легирующими элементами сходны с превращениями для титана. Цирконий и гафний имеют две аллотропические модификации. Низкотемпературная α-модификация циркония, существующая до 862 °С, имеет ГПУ-решетку со следующими параметрами при 25°С: $a = 3{,}232$ Å; $c = 5{,}147$ Å; $a/c = 1{,}589$. У высокотемпературной β-модификации, устойчивой от 862 °С до температуры плавления, — ОЦК-решетка. Период решетки β-модификации при 870°С равен 3,610 Å, при 20°С — 3,590 Å.

По влиянию на полиморфизм циркония все легирующие элементы можно разбить на α(Sn, Hf)- и β(Fe, Cr, Mo, Nb)-стабилизаторы. По аналогии с титаном циркониевые сплавы можно разделить на α-, $\alpha + \beta$- и β-сплавы. Структура сплавов первого класса представлена α-фазой или α-фазой с интерметаллидами; сплавы второго класса имеют структуру, представленную α- и β-фазами; β-сплавы могут иметь структуру, представленную β-фазой или β-фазой с интерметаллидами. В табл. 29 приведены промышленные α- и $\alpha + \beta$-сплавы. Сплав Zr — 2,5% Nb нашел наибольшее применение в промышленности.

29. Химический состав и механические свойства циркониевых сплавов

Сплав	Содержание легирующих элементов, %					Температура испытаний, °С	$\sigma_в$, кгс/мм²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм²	δ, %
	Nb	Sn	Fe	Cr	Ni				
Zr + 1% Nb	1	—	—	—	—	20	35	20	35
Zr + 2,5% Nb	2,5	—	—	—	—	300	20	12	38
						20	43	40,5	25
						300	27,5	25	30
Оженит 0,5	0,1	0,20	0,1	—	0,1	20	31,5	15,5	35
Цирколой 2	—	1,5	0,12	0,15	0,08		48	31,5	30
						300	21,6	11,4	29,6
								31,5	29
Цирколой 3	—	0,25	0,25	—	—	20	50,6		
Цирколой 4	—	1,5	0,15	0,1	0,007		48	31	30

В циркониевых сплавах, как и в титановых, при быстром охлаждении происходит мартенситное превращение. Образуются две мартенситные фазы — гексоганальная α' и ромбическая α''. Полностью стабилизируют β-фазу лишь ниобий и молибден. Метастабильная ω-фаза, образующаяся в циркониевых сплавах (с Ti, Cr, Mo, V, Re, Nb, Pd) при быстром охлаждении и старении, аналогична встречающейся в титановых сплавах и приводит к охрупчиванию металла.

Схема распада метастабильной β-фазы в общих чертах такая же, как в титановых сплавах, при температурах выше 500—525°С — по схеме $\beta_м \rightarrow \alpha + \beta_р$, при температурах ниже 500—525°С — по схеме $\beta_м \rightarrow \beta_п + \omega \rightarrow \beta_п + \omega + \alpha \rightarrow \beta_р + \alpha$, где $\beta_м \beta_п \beta_р$ — фаза метастабильная, промежуточная и равновесная.

В отличие от титана полиморфное $\alpha \rightleftarrows \beta$ -превращение циркония происходит со значительным изменением объема. Плотность α-циркония при температуре полиморфного превращения составляет 6,36 г/см³, а β-циркония — 6,40 г/см³. Примеси внедрения (O_2, N_2, H_2, C) оказывают двойное влияние: с одной стороны, как и в титане, вызывают охрупчивание металла, с другой резко снижают коррозионную стойкость металла и сварных соединений. Наиболее вредное влияние на коррозионную стойкость оказывают азот и углерод. Их содержание не должно превышать соответственно 0,003 и 0,03%. Водород, как и в титане, вызывает охрупчивание вследствие гидридного превращения. Предельная растворимость водорода в α-цирконии 0,0008%.

Наиболее сложной технологической проблемой при сварке циркониевых сплавов является обеспечение коррозионной стойкости сварных соединений в таких средах, как вода, пар, влажный воздух при 300 °С и выше на уровне свойств основного металла. На коррозионную стойкость сварных соединений кроме загрязнений примесями внедрения влияет структурная и фазовая неоднородность отдельных зон сварных соединений [7]. Лучшей стойкостью обладают соединения, фазовый состав которых близок к равновесному состоянию сплава. Это достигается за счет оптимальных скоростей охлаждения металла при сварке и термомеханической обработке, заключающейся в отжиге при температуре ниже фазового превраще-

ния (для сплава Zr + 2,5% Nb — 580 °С; время выдержки 1 ч) при предварительной деформации металла сварного соединения [3].

Цирконий, гафний и их сплавы хорошо свариваются вольфрамовым электродом в инертном газе при прямой полярности постоянным током с применением технологии и техники, аналогичной технологии и технике сварки титана. Ввиду высокой активности и возможного понижения коррозионной стойкости при насыщении примесями внедрения сварку целесообразно проводить в защитных камерах с контролируемой атмосферой. Лучшие результаты обеспечивает сварка в вакууме. Используется в основном электронно-лучевая сварка как в стационарном, так и в импульсном режимах. В последнем случае обеспечиваются лучшие условия качественного формирования шва и регулирования структуры соединения.

Ориентировочные режимы электронно-лучевой сварки сплава Zr + 2,5% Nb толщиной 4 мм при ускоряющем напряжении 20 кВ и скорости сварки 10 м/ч: а) сварочный ток 50—60 мкА при сварке корня шва в стационарном режиме расфокусированным лучом без присадки; сварочный ток 60—80 мкА при заполнении шва с использованием присадочной проволоки диаметром 1,4—1,6 мм; б) сварочный ток 55—80 мкА при сварке в импульсном режиме без присадки.

Контактная сварка может быть использована для сварки циркония и его сплавов (шовная, стыковая, оплавлением). Высокое сопротивление в сочетании с низкой теплопроводностью облегчают процесс контактной сварки. Режимы сварки близки к режимам при сварке титана. Остаточные сварочные напряжения в циркониевых сплавах, как и у титана, меньше условного предела текучести [7].

СВАРКА ВАНАДИЯ, НИОБИЯ И ТАНТАЛА

Сведения об этих металлах имеются в работах [1, 2, 9, 10, 13, 18, 20, 21, 23, 28]. Перспектива применения ванадия и сплавов на его основе определяется значительной удельной прочностью при умеренно высоких температурах (650—900 °С), низким сечением захвата тепловых нейтронов, высокой коррозионной стойкостью в сочетании с хорошей технологичностью. Недостатком является относительно низкая для тугоплавких металлов температура плавления (1900 С°) и очень большая склонность к окислению, обусловленная неустойчивостью, летучестью и низкой температурой (675 °С) плавления его окисла V_2O_5. Ниобий и сплавы на его основе отличаются высокой температурой плавления, жаропрочностью, малым сечением захвата тепловых нейтронов, высокой коррозионной стойкостью, самой малой плотностью из жаропрочных металлов (W, Mo, Ta, Nb), высокой технологичностью и свариваемостью. Недостатками являются большая склонность к окислению и малый модуль Юнга. Основные преимущества сплавов на основе тантала — высокая жаропрочность, коррозионная стойкость, хорошая технологичность и свариваемость. Недостатки тантала — большая плотность, сильная окисляемость при повышенных температурах, высокая стоимость.

В промышленности используют преимущественно сплавы этих металлов, упрочняемые путем упрочнения твердого раствора и образования мелкодисперсной фазы. Наиболее сильными упрочнителями для ниобия являются Zr, Hf, W, Mo, V; для тантала — V, Mo, Hf, W, а также Ru, Re, Os; для ванадия — Ti, Zr, Nb, W. При создании сплавов с повышенной жаропрочностью на основе ниобия и тантала в качестве легирующих элементов используют углерод, азот, бор, которые наряду с некоторым упрочнением твердого раствора образуют вторую дисперсную фазу (карбиды, нитриды, бориды), упрочняющую металл особенно эффективно при одновременном введении Ti, Zr, Hf. Из рассматриваемых металлов V группы наибольшее применение имеют сплавы на основе ниобия. Составы основных отечественных сплавов приведены в табл. 30.

Отличительными особенностями при сварке этих металлов являются высокая, как и для металлов IV группы, окисляемость, активность и чувствительность к примесям внедрения. Ниобий и тантал образуют тугоплавкие окислы, однако температуры их плавления ниже температуры плавления металла (1460 °С для

Nb_2O_5 и 1900 °С для Ta_2O_5). Удельный объем окислов значительно превышает удельный объем основного металла, поэтому окисные пленки растрескиваются и отслаиваются, открывая доступ кислороду к поверхности металла. Окисел ванадия (V_2O_5) летуч и имеет низкую температуру плавления (675 °С); поэтому окисная пленка не защищает металл от окисления. Окисление начинается с температур $\geqslant$ 200—250 °С для Nb, $\geqslant$ 300 °С для Та и $\geqslant$400 °С для V. С азотом эти металлы взаимодействуют в меньшей степени, чем с кислородом, и устойчивы до следующих температур: Nb — до 350 °С, Та — до 450 °С, V — до 800 °С. Нитриды представляют твердые тугоплавкие соединения.

30. Химический состав и механические свойства ниобиевых сплавов

Сплав	Содержание легирующих элементов, %				Состояние материала	$\sigma_в$, кгс/мм²	δ, %
	Mo	Zr	Ti	C			
ВН2	3,8—5,2	—	—	0,05	Н	85	4
ВН2А	3,5—4,7	0,5—0,9	—	0,08		85	4,5
ВН3	4,0—5,2	0,8—2,0	—	0,08—0,16		80	18
ВН4	8,5—10,5	1—2	0,01—0,05	0,25—0,40	О	81	16
ВН5А	5,0—7,0	0,5—0,95	0,015—0,04	0,08—0,15	Р	60	27
ВН-2АЭМ	6—8,0	0,5—0,9	La + Ge	0,05—0,09	Н	80	4
ВН7	—	3—7	40	0,06—0,10	—	—	—
РН6	4,5—6 4,5—6W	1	—	—		89	4

Примечание. Состояние материала: Н — нагартованное; О — отожженное; Р — рекристаллизованное.

Ванадий, ниобий и тантал с активированной вакуумным отжигом поверхностью начинают в заметной степени поглощать водород при температурах выше 300, 250 и 500 °С соответственно; растворимость водорода в этих металлах при 20 °С велика и достигает 15 000, 10 400 и 5000 см³/100 г соответственно.

Чувствительность металлов V группы к влиянию примесей внедрения в связи со значительной растворимостью ниже, чем для металлов VI группы, однако примеси внедрения также вызывают резкое снижение пластических свойств и повышение порога хладноломкости.

Хладноломкость металлов V группы обусловлена растворенными атомами внедрения. Металлы высокой чистоты сохраняют повышенную пластичность даже при температурах, близких к абсолютному нулю. Повышенное содержание примесей приводит к сдвигу порога хладноломкости в область положительных температур (см. рис. 4). Тантал в отличие от других металлов с ОЦК-решеткой не склонен к хладноломкости. Для обеспечения пластичности допустимое содержание примесей в металле шва и зоне термического влияния ограничивается ($O_2 \leqslant 0{,}02\%$; $N_2 \leqslant 0{,}03\%$; $H_2 \leqslant 0{,}005\%$). Повышенная чувствительность тугоплавких металлов к примесям внедрения требует применения способов сварки в контролируемых защитных средах — вакууме, чистых или сверхчистых инертных газах при содержании примесей не более $10^{-4}\%$ O_2, $4 \cdot 10^{-4}\%$ N_2, влаги $10^{-4}\%$ по объему.

Чувствительность металлов V группы к термическому циклу сварки зависит от содержания примесей внедрения и легирующих элементов. Эти металлы не претерпевают полиморфного превращения. Образование крупного зерна в шве, рост зерна в зоне термического влияния, рекристаллизация снижают пластические свойства и повышают порог хладноломкости. Температура рекристаллизации понижается с увеличением степени деформации (критическая степень деформа-

ции 5—20%) и при больших ее значениях составляет 800 °С для V, 940 °С для Nb, 1250 °С для Та. Снижение прочности при рекристаллизации, в том числе в зонах сварного соединения, подверженных рекристаллизации, не сопровождается для этих металлов снижением пластичности, если не происходит резкого роста зерна. Так как металлы высокой чистоты имеют порог хладноломкости ниже 20 °С, то они могут хорошо свариваться без подогрева. Прочность сварных соединений Nb составляет 0,6—0,8 прочности основного металла. Металлы с повышенным содержанием примесей и высоким порогом хладноломкости (исключая Та) целесообразно сваривать с подогревом.

Сплавы чувствительнее к термическому циклу и параметрам термического цикла, чем чистые металлы, в связи с более низкой пластичностью, выпадением вторичных фаз и дисперсионным твердением. Например, сварка ниобиевых сплавов системы Nb — ΣMe — C с гетерофазным упрочнением за счет выделений карбидов сопряжена с трудностями, обусловленными низкими ударной вязкостью и пластичностью вследствие развития процессов дисперсионного твердения. Сплавы системы Nb — Zr — C с содержанием $C < 0{,}002\%$ не чувствительны к параметрам термического цикла. При бо́льших содержаниях происходит распад пересыщенного твердого раствора в процессе охлаждения при сварке [1]. При содержании углерода в этих сплавах свыше 0,02% распад пересыщенного твердого раствора происходит непосредственно в процессе охлаждения при сварке тем интенсивнее, чем больше время пребывания металла в интервале температур 800—1000 °С. Предотвращение распада и сохранение пластических свойств достигаются при определенных скоростях охлаждения. Наибольшая ударная вязкость достигается для сплавов в виде тонких листов при скоростях сварки 40—60 м/ч. Максимальная ударная вязкость сварных соединений ниобиевого сплава Nb — — W — Mo — Zr — C была получена при скоростях сварки более 40 м/ч [2]. Благоприятное сочетание прочности, пластичности и ударной вязкости материала сварного шва достигается после окончательной термической обработки в интервале температур 1200—1300° С с выдержкой 1 ч, что обусловлено растворением иглообразных выделений метастабильных карбидов по границам и в теле зерна и последующим выделением вместо них дисперсных частиц типа (Nb, Zr) C.

При сварке плавлением технического тантала и некоторых его сплавов, содержащих Nb, V, W, при соблюдении тщательной защиты от атмосферных газов (содержание в сварочной атмосфере $O_2 < 0{,}003\%$, $N_2 < 0{,}01\%$) обеспечиваются высокая пластичность и равнопрочность сварных соединений основному металлу.

Высокие температуры плавления и относительно высокая теплопроводность ниобия и тантала вызывают необходимость применения концентрированных источников энергии при сварке плавлением. Используют следующие способы сварки: плавлением в вакууме и в среде инертных газов, контактную точечную и роликовую, диффузионную в вакууме, трением на воздухе, в среде инертных газов и в вакууме. Из перечисленных в основном применяют сварку плавлением — электронно-лучевую и дуговую в среде аргона или гелия. Детали на сварку поступают, как правило, после механической обработки; перед сваркой их подвергают травлению в смеси азотной и плавиковой, а также серной кислот (для деталей из ниобия — 40% HF + 60% HNO_3, 22% HF + 8% HNO_3 + 15% H_2SO_4 + 55% H_2O; для деталей из тантала — 90% HF + 10% HNO_3), зачищают инструментом; непосредственно перед сваркой стыкуемые кромки обезжиривают и обезвоживают этиловым спиртом.

При дуговой сварке в среде инертных газов лучшие результаты обеспечиваются при сварке в камерах с контролируемой атмосферой или с местной защитой приточным инертным газом в накидных камерах. В случаях, когда требуется высокая точность размеров конструкций, целесообразно применять электронно-лучевую сварку. Используют сварку сфокусированным, импульсным и расфокусированным лучами; последняя уменьшает вероятность появления трещин и прожогов.

Сплавы на основе ниобия и тантала, особенно наиболее жаропрочные, склонны к межкристаллитному разрушению при сварке (горячие трещины) [23], а также замедленному разрушению (холодные трещины). Основные пути повышения сопротивляемости этих сплавов образованию горячих трещин: легирование элементами, снижающими диффузионную подвижность атомов в решетке или способствующими созданию фрагментарной литой структуры; повышение чистоты основного и присадочного металлов по примесям внедрения; применение рациональной технологии сварки, обеспечивающей сокращение времени нахождения металла при температуре высокой диффузионной подвижности (увеличение скорости охлаждения металла сварных швов).

Механизм замедленного разрушения металлов V группы, как и металлов IV группы, связан с водородной хрупкостью. Однако в связи с большей предельной растворимостью водорода и примесей внедрения чувствительность металлов V группы к этому виду разрушения ниже, чем у металлов IV группы.

В сплавах ниобия пористость наиболее часто возникает в зоне сплавления. Наиболее вероятной причиной возникновения пор могут быть кислород, летучие окислы ниобия, нитриды, а также CO и CO_2, образующиеся при взаимодействии окислов с углеродом или карбидом. Прочность сварных соединений при аргонодуговой сварке ниобиевых сплавов составляет 0,75—0,8 от прочности основного металла, при электронно-лучевой сварке 0,6—0,75, для тантала ~1. Прочность при электронно-лучевой сварке ниже в связи с очищением шва от примесей в вакууме и в связи с особенностями термического цикла. Примерные режимы сварки плавлением приведены в табл. 31 и 32.

31. Режимы сварки тугоплавких металлов и их сплавов

Металлы	Толщина, мм	Аргонодуговая сварка			Электронно-лучевая сварка		
		Сварочный ток, А	Напряжение, В	Скорость сварки, м/ч	Ток, мА	Ускоряющее напряжение, кВ	Скорость сварки, м/ч
Ванадий	1	140	9—10	50	60—67	12,5—12,7	60
	2	320	16—18	50	90—100	12,5—12,7	60
	0,5	85—90	8—9	30—40	25—30	17—17,5	20—30
Ниобий	1	150—160	10	40	65—70	17—17,5	30
	1,5	190	12	30	85	27	30
	0,5	70—80	8—10	30—35	—	—	—
Тантал	1,0	130—140	10—12	25—30	—	—	—
	1,5	160—180	12—14	25—30	—	—	—
Молибден	1	—	—	—	70—90	18—20	60
	2	—	—	—	100—120	20—22	40
	3	—	—	—	200—250	20—22	30

Диффузионную сварку осуществляют в установках типа СДВУ-2 при вакууме 10^{-5} мм рт. ст. с нагревом деталей индукционным способом. Машины для сварки трением оснащают герметичными камерами для защиты свариваемых деталей и вакуумной системой. Контактную сварку ниобия, тантала и сплавов на их основе осуществляют по особой технологии. Прилипание электродов уменьшается при использовании электродов с молибденовыми накладками, а также на основе сплавов W — Mo.

32. Ориентировочные режимы однопроходной аргонодуговой сварки тугоплавких сплавов

Сплав	δ, мм	Ручная сварка		Автоматическая сварка	
		Ток, А	Скорость, м/ч	Ток, А	Скорость, м/ч
ЦМ6	1 2	130 250*	10	55 270*	16
ТВ-10	1 2	145 280*	10	60 150*	16 12
5ВМЦ	1 2	120 180*	10	45 80	16 14

*) С присадочным материалом.

33. Пластичные сплавы на основе хрома

Марка	Химический состав, %	$\sigma_в$, кгс/мм²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм²	δ, %	$a_н$, кгс·м/см²
ВХ1	Технический хром	30	19	5	0,1
ВХ2	0,1—0,2 Ti; 0,1—0,35 V	35	25		
ВХ4	0,1 Ti; 0,3 N; 32 Ni; 1,5 W	100	85	8	0,5

СВАРКА ХРОМА, МОЛИБДЕНА, ВОЛЬФРАМА

Свойства данных металлов рассмотрены в работах [9, 10, 12, 13, 17, 18, 20, 21, 28]. Преимуществами хрома являются высокая окалиностойкость в сочетании с относительно высокой температурой плавления, прочностью и малой плотностью. Однако низкая сопротивляемость тепловым и ударным нагрузкам и исключительно высокая склонность к хладноломкости по сравнению с другими тугоплавкими металлами ограничивают возможность его использования в сварных конструкциях. Молибден и вольфрам являются основой для создания жаропрочных сплавов в связи с их высокими тугоплавкостью, модулем упругости, термостойкостью, тепло- и электропроводностью. Преимуществом молибдена является вдвое меньшая, чем у вольфрама, плотность. Вольфрам обладает высокой тугоплавкостью. Общими недостатками являются низкая окалиностойкость и высокая склонность к хладноломкости.

Для металлов VI группы (Cr, Mo, W) характерна ничтожная растворимость примесей внедрения, обусловленная небольшими размерами атомов и междуузлий, а также их электронным строением, и чрезвычайно высокая чувствительность к наличию примесей. Превышение пределов растворимости приводит к образованию соединений металлов с примесями внедрения (оксидов, нитридов, карбидов и др.), располагающихся преимущественно по границам зерен и охрупчивающих их. Наиболее сильно охрупчивает кислород. Растворенный в твердом металле, кислород резко увеличивает твердость, а хрупкие окислы, имеющие слабую связь с металлом, располагаясь по границам зерен, часто катастрофически снижают прочность и пластичность металлов.

Хладноломкими эти металлы делают примеси. Температура перехода металлов в хрупкое состояние резко повышается с увеличением концентрации примесей внедрения. В зависимости от содержания примесей температура перехода из вязкого состояния в хрупкое колеблется для хрома от —70 до 600° С, для молибдена до 480° С, для вольфрама до 330° С. У металлов VI группы в рекристаллизованном состоянии температура перехода в хрупкое состояние примерно на 300° С выше, чем в деформированном. Причиной этого является неблагоприятное расположение неметаллических включений в рекристаллизованном металле, в котором они находятся в виде сплошной пленки по границам зерен. Температура рекристаллизации равна примерно $0{,}4\,T_{пл}$ К и составляет 950° С для хрома, 1150° С для молибдена, 1250 °С для вольфрама.

В конструкциях эти металлы используются в виде сплавов. Для сохранения пластичности и повышения прочности металлов VI группы осуществляют легирование: а) элементами (в количестве < 1%), имеющими с этими металлами большое сродство и образующими растворы замещения; указанные элементы существенно уменьшают влияние примесей; Zr, Hf, Ca, V, La, образуя нитриды, очищают матрицу сплава от этой примеси; Nb, Ta, Ti, Zr хорошо связывают также углерод; Ti, Zr, V, Ge, La очищают от кислорода; б) металлическими элементами совместно с углеродом для гетерофазного упрочнения путем образования мелкодисперсной фазы в матрице сплава. Углерод, наряду с тем, что является раскислителем и модификатором, образует карбиды с этими элементами; в) элементами для образования твердого раствора; легирование допускается: для хрома — никелем, рением; для молибдена — рением, вольфрамом; для вольфрама — рением и молибденом.

34. Промышленные сплавы на основе молибдена

Сплав	Содержание элементов, %				Температура рекристаллизации, °С	Состояние материала	$\sigma_в$, кгс/мм²	σ_{100} при 1200° С, кгс/мм²	δ, %
	Zr	Ti	C	Прочие					
МЧВП	—	—	0,02—0,06	—	1000	Р	65	—	15
ТСМ3	—	—	0,06—0,10	0,03—0,10 Ni			—	—	—
ЦМ1	—	—	0,01—0,03	—		Д	70	4	—
ЦМ2А	0,07—0,15	0,07—0,3	0,004	—	1300		80	10	10
ВМ1	0,08—0,25	До 0,4	0,01	0,6 W					
ЦМ6	0,1—0,2	—	0,004	0,001—0,003 B			77	14	12
МЛТ	—	0,5	0,01—0,02	0,05 La	1200	—	—		—
ВМ2	0,25—0,40	До 0,2	0,02	—	—	Д	75	—	10
ВМ3	0,3—0,6	0,8—1,3	0,25—0,5	1,0—1,8 Nb		О	83		0,3
ЦМ3	0,25—0,35	—	0,025—0,04	—	1500		—	19	—
ЦМ5	0,4—0,6	—	0,04—0,07	—	1600		77,5	20	11,5
ТСМ4	0,15	—	0,02—0,04	0,05—0,1 Ni	—	—	—	—	
ЦМВ30	—	—	0,01	30W, добавки Zr, Ti, B, Al, C	1400	Д	55,3	25	—
МР47ВП	—	—	—	47 Re	—	—	—	—	—

Примечание. Состояние материала: Р — рекристаллизованное; Д — деформированное; О — отожженное.

Химический состав и свойства серийных сплавов приведены в табл. 33 и 34. Основными легирующими элементами являются элементы IV группы — Ti, Zr, Hf. В небольших количествах вводится углерод (0,04—0,06%) как раскислитель, модификатор и для упрочнения сплава за счет образования второй фазы. Введение бора (0,001—0,003%) способствует увеличению пластичности за счет измельчения зерна и безоксидирующего действия. Введение в металл Fe, Co, Ni, Ir (молибденовые сплавы серии ТСМ) повышает пластичность вследствие концентрации этих

элементов в пограничных областях и препятствия образованию окислов основного металла на границах в результате уменьшения энергии дефектов упаковки и усиления металлической связи. На металлы VI группы благоприятно влияет рений (при содержании > 20—25%); одновременно он повышает прочность и пластичность и резко уменьшает склонность к хладоломкости в связи с интенсивным развитием двойникования при деформации, очищением границ зерен от примесей, повышением предельной растворимости примесей. Сплавы рения с вольфрамом, молибденом, танталом и ниобием являются наиболее жаропрочными. В промышленном масштабе используются сплавы ВР-27ВП (W — 27% Re), МР-47ВП (Mo — 47% Re). Перспективны сплавы серии МВР27ВП системы Mo — W—Re с содержанием рения $\sim$ 27%. Эти сплавы сочетают высокую жаропрочность, пластичность, свариваемость.

Металлы VI группы и сплавы на их основе обладают наихудшей свариваемостью (за исключением сплавов с рением) среди других тугоплавких металлов прежде всего в связи с ничтожной растворимостью и наиболее высокой чувствительностью к примесям внедрения.

При сварке этих металлов наблюдаются следующие характерные особенности. Химическая активность металлов этой группы по отношению к примесям внедрения ниже, чем у тугоплавких металлов IV и V групп. Однако при высоких температурах, характерных для сварки плавлением, они активно реагируют с окислителями. Молибден и вольфрам не образуют оксидов, устойчивых при высоких температурах. Лишь оксид хрома Cr_2O_3 является пассивирующим при высоких температурах. Заметное окисление хрома начинается с температур выше 780° С. Окисление на воздухе молибдена и вольфрама начинается при температуре около 300° С. При температурах ниже 475° С на молибдене происходит образование плотно прилегающей окисной пленки. Скорость окисления незначительна и определяется скоростями диффузии ионов металла и кислорода через пленку окисла. В интервале температур 475—700° С наряду с образованием окисной пленки происходит испарение оксида молибдена, ускоряющееся с повышением температуры; при высокой температуре окисной пленки на поверхности молибдена не образуется, и наблюдается только испарение окисла. Пары воды вызывают быстрое окисление молибдена при температурах выше 700° С. В азоте хром устойчив до 650° С, молибден до 1500° С, нитриды не устойчивы, вольфрам и рений не реагируют с азотом. Хром, молибден и вольфрам образуют тугоплавкие прочные соединения с углеродом, бором, кремнием.

В отличие от металлов IV и V групп эти металлы не образуют устойчивых гидридов. Водород в этих металлах образует твердые растворы внедрения и обладает большой подвижностью, десорбируясь при охлаждении, поэтому эти металлы не склонны к водородной хрупкости. Несмотря на меньшую, чем у металлов IV и V групп, активность, требуется более тщательная их защита (в связи с повышенной чувствительностью к примесям внедрения) путем сварки в высоком вакууме и инертных газах высокой чистоты. Металлы этой группы чрезвычайно чувствительны к термическому циклу сварки при наличии примесей, содержание которых в исходном материале, как правило, значительно выше предела растворимости. Увеличение зерна, перегрев, рекристаллизация, появление примесных фаз на границах зерен под действием термического цикла приводят к резкому увеличению порога хладноломкости и склонности к горячим трещинам. Температура порога хладноломкости металла шва и рекристаллизованной зоны термического влияния, как правило, выше 20° С. Для рекристаллизованной зоны характерен провал пластичности. Высокая склонность к горячим трещинам связана: а) с наличием примесей внедрения, вызывающих охрупчивание металла и образование легкоплавких эвтектик по границам зерен; б) с высокими напряжениями и темпом деформаций в связи с большим модулем упругости.

Свариваемость и свойства сварных соединений зависят от неоднородности свойств исходного материала в связи с неоднородным распределением (по площади и толщине) примесей внедрения, различными размерами, формой и количеством частиц второй фазы, состоянием твердого раствора. На участках с повышенным

содержанием примесей при сварке происходит преимущественное образование трещин, местное снижение порога хладноломкости и пластичности.

На свойства сварных соединений влияют параметры термического цикла, прежде всего скорость охлаждения, от которой зависит выделение второй фазы (карбидов, нитридов и др.), вид (глобулярный, игольчатый, пластинчатый) и зоны выделений (на границе, в теле зерна). Оптимальные параметры цикла определяются природой сплава, толщиной металла, методом сварки.

Влияние теплофизических характеристик этих металлов при сварке проявляется в следующем. Высокие температура плавления и теплопроводность вызывают необходимость сосредоточенности источников энергии для сварки. Высокий модуль упругости в сочетании со значительной зоной упругопластических деформаций способствует появлению больших остаточных напряжений, однако малый коэффициент линейного расширения этих металлов уменьшает такое влияние.

Качественные сварные соединения получаются при использовании металлов высокой чистоты и однородности по примесям. Необходимо использовать также методы сварки, обеспечивающие образование сварного соединения без насыщения примесями внедрения. Основными из них являются методы сварки плавлением: электронно-лучевая, дуговая в среде инертных газов в камерах с контролируемой атмосферой, сварка полым катодом, лазером. Хорошее качество соединений достигается при диффузионной сварке. Возможно получение соединений вольфрама химическим осаждением по реакции

$$WF_{6газ} + 3H_{2газ} \rightarrow W_{тв} + 6HF_{газ},$$

однако для соединений характерны высокий порог хладноломкости (510—560° С) и пористость в результате выделения газов по границам во время затвердевания сварочной ванны.

Хорошее качество сварных соединений достигается при применении присадочных материалов с пониженной чувствительностью к примесям внедрения. Например, легирование металла шва при сварке молибденовых сплавов ВМ1, ЦМ2, ЦМ6 рением в пределах 45—50% Re (по массе) является эффективным средством повышения его пластичности. Для легирования используют проволоку МР47-ВП или фольгу из чистого рения. Введение в молибден элементов-модификаторов (углерод $\leqslant 0{,}06\%$) и элементов VIII группы (Fe, Co, Ni, Ir) повышает пластичность в литом и рекристаллизованном состоянии в связи с измельчением зерна, снижение предела текучести, уменьшением структурной и химической неоднородности по сечению соединения. В сплавах, содержащих углерод, цирконий и титан повышают пластичность ($<1\%$).

Оптимальная техника и технология сварки предусматривают качественную подготовку кромок под сварку, защиту и регулирование параметров режима сварки, главным образом скорости охлаждения.

Предварительный нагрев способствует переходу металла из хрупкого состояния в пластическое (при температурах подогрева выше порога хладноломкости), но в то же время оказывает неблагоприятное действие в связи с диффузионным перераспределением примесей, выпаданием их соединений по границам, а также образованием вторичных фаз. Поэтому целесообразность предварительного нагрева зависит от чистоты используемого металла и системы его легирования. Рекомендуемые температуры предварительного нагрева для молибдена 200—300° С для вольфрама 300—600° С.

На повышение пластичности сварных соединений влияет отжиг основного металла перед сваркой для уменьшения содержания примесей внедрения и их неоднородности. Отжиг после сварки используют для снятия остаточных напряжений и улучшения структуры. Температура отжига для молибдена $\sim$1000° С, для вольфрама $\sim$1250° С.

СВАРКА ТУГОПЛАВКИХ ПЛАТИНОВЫХ МЕТАЛЛОВ

К тугоплавким металлам VIII группы относятся благородные платиновые металлы: легкие (рутений Ru, родий Rh, палладий Pd) и тяжелые (осмий Os, иридий Ir, платина Pt); Ru, Rh, Os, Ir используют в основном в технически чистом виде и в сплавах с платиной. Платину и палладий применяют преимущественно в виде двойных и тройных сплавов с другими платиновыми металлами, а также с медью, никелем, кобальтом, золотом, серебром. Свойства металлов этой группы имеются в [13, 25, 28].

Тугоплавкие металлы VIII группы обладают наименьшей химической активностью и чувствительностью к примесям внедрения по сравнению с другими тугоплавкими металлами. Однако, несмотря на малую химическую активность, платиновые металлы вступают во взаимодействие с окружающими средами, особенно при высоких температурах. Осмий начинает окисляться при 20°С, рутений — при 100° С, палладий при 350° С, родий и иридий при 600° С. В окислительной атмосфере платиновые металлы могут постепенно улетучиваться в виде своих оксидов и особенно галидов, представляющих собой непрочные и летучие соединения. Семейство платиновых не образует гидридов, но водород может находиться в них в виде твердых растворов внедрения, ухудшая пластичность. Из этих металлов наибольшая абсорбирующая способность к водороду проявляется у палладия и его сплавов. Среди тяжелых платиновых металлов (Os, Ir, Pt) максимальная растворимость водорода наблюдается у иридия, что способствует образованию пор при сварке. Общими особенностями при сварке платиновых металлов являются: склонность к росту зерна и перегреву, летучесть окислов, опасность образования пор, возможно образование горячих трещин.

По особенностям сварки в соответствии с расположением в периодической системе элементов и физико-химическими свойствами платиновые металлы можно разделить на следующие подгруппы (по мере ухудшения свариваемости): а) палладий, платина; б) родий, иридий; в) рутений, осмий.

Платина и палладий имеют относительно низкие температуру, теплоту плавления и теплоемкость, высокую пластичность и хорошую свариваемость. Эти металлы хорошо свариваются в защитных газах неплавящимся электродом, сопротивлением, газовой сваркой (для которой предпочтительны нейтральные или слабоокислительные атмосферы), легко соединяются свободной ковкой на воздухе при температуре 0,75—0,95 температуры плавления. Родий и иридий сваривают в защитных инертных газах и сопротивлением. Особенностями, резко ухудшающими свариваемость рутения и осмия по сравнению с другими платиновыми металлами, являются: а) высокая окисляемость с образованием нестойких летучих ядовитых окислов; б) высокие прочность и твердость, а также низкая пластичность (осмий практически не поддается механической обработке в холодном состоянии; рутений может быть обработан с большим трудом); в) склонность к хладноломкости; г) в отличие от других платиновых металлов, имеющих ГЦК-решетку, рутений и осмий имеют ГПУ-решетку и большую анизотропию свойств. Отмеченные обстоятельства, а также близость теплофизических свойств к свойствам металлов VI группы, вызывают необходимость применения для сварки рутения и осмия способов, техники и технологии, аналогичных применяемым при сварке молибдена и вольфрама (сварку: дуговую в защитных газах с контролируемой атмосферой, электронно-лучевую, сопротивлением).

Список литературы

1. **Арефьев Ю. В., Чернышева Т. А.** Старение ниобиевых сплавов системы Nb—1Zr—C. — «Сварочное производство», 1973, № 10, с. 7—10.

2. **Влияние** режимов сварки и термической обработки на структуру и свойства соединений ниобиевого сплава системы Nb—W—Mo—Zr—C. — «Сварочное производство», 1975, № 10, с. 29—31. Авт.: Е. Н. Аснис и др.

3. **Влияние** пластической деформации и последующего отжига на структуру и коррозионную стойкость сварных соединений циркониевого сплава с 2,5% ниобия. — «Сварочное производство», 1976, № 5, с. 13—15. Авт. В. Н. Тюрин и др.

4. **Глазунов С. Г., Моисеев В. Н.** Конструкционные титановые сплавы. М., «Металлургия», 1974. 368 с.

5. **Грабин В. Ф.** Основы металловедения и термической обработки сварных соединений титановых сплавов. Киев, «Наукова думка», 1975. 264 с.

6. **Дуглас Д.** Металловедение циркония. М., Атомиздат, 1975. 360 с.

7. **Исследование** неоднородности сварных соединений сплава циркония с 2,5% ниобия. — «Сварочное производство», 1972, № 4, с. 27—30. Авт.: О. И. Стеклов и др.

8. **Исследование** сварки давлением в жидкой среде титановых сплавов. — «Сварочное производство», 1976, № 11, с. 34—35. Авт.: Л. Ф. Горбульский и др.

9. **Казаков Н. Ф.** Диффузионная сварка материалов. М., «Машиностроение», 1976. 312 с.

10. **Колачев Б. А., Ливанов В. А., Елагин В. И.** Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М., «Металлургия», 1972. 480 с.

11. **Петров А. В.** Сварка закрытой сжатой дугой. — «Сварочное производство», 1972, № 4, с. 15—17.

12. **Применение** рения для повышения пластичности сварных соединений молибденовых сплавов. В кн.: Исследование и применение сплавов рения. М., «Наука», 1975, с. 179—182. Авт.: Б. П. Морозов и др.

13. **Савицкий Е. М., Бурханов Г. С.** Металловедение сплавов тугоплавких и редких металлов. М., «Наука», 1971. 354 с.

14. **Сварка** высокопрочных сплавов титана. М., «Машиностроение», 1975. 150 с. Авт.: С. М. Гуревич и др.

15. **Сварка** титановых сплавов через промежуточную медную прокладку. — Бюллетень «Цветная металлургия», 1976, № 12, с. 15—16. Авт.: З. П. Адно и др.

16. **Сварка** титановых сплавов ОТ4, ВТ6 и ВТ15 в твердом состоянии в режиме сверхпластичности. — «Сварочное производство», 1975, № 10, с. 20—22. Авт.: М. Х. Шоршоров и др.

17. **Сплавы** молибдена. М., «Металлургия», 1975. 392 с. Авт.: Н. Н. Моргунова и др.

18. **Справочник** по сварке. Под ред. А. И. Акулова. Т. 4. М., «Машиностроение», 1971. 415 с.

19. **Справочник** по сварке. Под ред. Е. В. Соколова. Т. 2. М., Машгиз, 1961. 664 с.

20. **Технология** электрической сварки металлов и сплавов плавлением. Под ред. Б. Е. Патона. М., «Машиностроение», 1974. 768 с.

21. **Тугоплавкие** металлы в машиностроении. Под ред. А. Т. Туманова и К. И. Портного. М., «Машиностроение», 1967. 392 с.

22. **Третьяков Ф. Е.** Сварка плавлением титана и его сплавов. М., «Машиностроение», 1967. 144 с.

23. **Чернышева Т. А., Шоршоров М. Х.** Горячие трещины в сварных соединениях тугоплавких металлов. Л., ЛДНТП, 1968. 32 с.

24. **Шоршоров М. Х., Мещеряков В. Н.** Фазовые превращения и изменения свойств сплавов титана при сварке. Атлас. М., «Наука», 1973. 159 с.

25. **Фролов В. В.** Химия. М., «Высшая школа», 1975. 544 с.

26. **Электрошлаковая** сварка титановых сплавов. Ташкент, «ФАН», 1975. 85 с. Авт.: Я. Ю. Коман и др.

27. **Хорев А. И.** Осиовные принципы разработки высокопрочных свариваемых титановых сплавов. — «Сварочное производство», 1975, № 10, с. 4—7.

28. **Welding** Handbook. Section four. Metals and Their Weldability «American Welding Society», 1972. 468 с.

Глава 14
СВАРКА РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ, МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

СВАРКА РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ

Особенности сварки

В современных машинах широко применяют конструкционные, жаропрочные и коррозионно-стойкие стали разных структурных классов. В большинстве случаев отдельные части машин целесообразно изготовлять сварными из разнородных сталей с использованием легированной стали лишь в наиболее напряженных участках или участках, подверженных действию высоких температур, коррозионных или абразивных сред. Такое решение обеспечивает наиболее полное использование материала в конструкции, приводит к резкому снижению расхода легированных сталей и дает большой экономический эффект. В конструкциях используют сварные соединения сталей одного структурного класса разного легирования или разных структурных классов (табл. 1).

1. Классификация сталей, применяемых в сварных соединениях разнородных сталей

Класс	Группа	Характеристика сталей	Марки
Перлитные	I	Низкоуглеродистые	ВСт3, 20
	II	Низкоуглеродистые и низколегированные конструкционные	ВСт5, 09Г2, 10ХСНД, 12ХН2, 20ХГСА
	III	Среднеуглеродистые низколегированные повышенной прочности	40Х, 30ХГСА, 40ХН2МА
	IV	Теплоустойчивые: хромомолибденовые	15ХМ, 20ХМЛ, 30ХМА
	V	хромомолибденованадиевые	12Х1МФ, 15Х1М1Ф
Мартенситные, ферритные и ферритно-мартенситные	VI	12%-ные хромистые коррозионно-стойкие	08Х13, 12Х13
	VII	Высокохромистые кислотостойкие и жаростойкие	12Х17, 15Х25Т, 14Х17Н2, Х25Н5ГМФ
	VIII	12%-ные хромистые жаропрочные	15Х11МФ, 15Х12ВНМФ
Аустенитно-ферритные и аустенитные стали и сплавы на железоникелевой основе	IX	Аустенитные и аустенитно-ферритные кислотостойкие и жаропрочные	12Х18Н10Т, 10Х17Н13М3Т, 12Х16Н9М2
	X	Жаропрочные аустенитные	ХН35ВТ 08Х15Н24В4ТР
	XI	Жаропрочные на никелевой основе	ХН65ВМТЮ
	XII	Жаростойкие аустенитные	20Х23Н18, 20Х25Н20С2 ХН78Т

Наибольшее распространение получили соединения перлитных сталей с аустенитными хромоникелевыми и мартенситно-ферритными высокохромистыми сталями.

На выбор сварочных материалов, технологию сварки и эксплуатационную надежность конструкций влияют условия их работы. Можно выделить три типа сварных соединений (табл. 2).

2. Условия работы и области применения сварных соединений из разнородных сталей

Условия работы	Область применения	Типы сварных узлов	Группы свариваемых сталей (см. табл. 1)
При нормальных температурах (общего назначения)	Строительные конструкции	Балки, фермы	I и II
	Трубопроводы	Присоединение вспомогательных элементов к трубам, стыки труб	
	Сосуды под давлением	Присоединение вспомогательных элементов (опоры и др.) и трубопроводов к оболочке сосуда	
	Узлы машин и механизмов	Зубчатые колеса, валы, рычаги	I и II, I и III, II и III
	Узлы гидротурбин	Рабочие колеса, статоры, лопасти	II и VI, II и IX
Коррозия и повышенные температуры	Агрегаты химии и нефтехимии	Присоединение трубопроводов и узлов крепления к оболочкам сосудов, теплообменные аппараты	I и VI, II и VI, I и VII, II и VII, I и VIII, II и VIII
При высоких температурах	Узлы энергетических установок	Диафрагмы паровых турбин, стыки трубопроводов, роторы	I (IV) и VI (VIII), V и X
		Стыки труб поверхностей нагрева и паропроводов	I (IV) и IX
		Камеры сгорания и горелки	I и XII
		Стыки трубопроводов с корпусом реактора	IV и IX

При изготовлении сварных соединений из разнородных сталей используется большинство существующих методов сварки. Соединения из различных сталей одного структурного класса могут быть получены с использованием тех же режимов и технологии сварки, что и соединения однородных сталей данного класса. Если сваривают стали разного структурного класса, то следует выбирать режимы и технологию, обеспечивающие минимальное проплавление основного металла [27]. В отдельных узлах можно применять электрошлаковую сварку. Целесообразно более широко использовать электронно-лучевую сварку и особенно сварку с расплавляющейся прокладкой, состав которой выбирают из условия получения оптимальных свойств шва.

Сварка давлением позволяет осуществлять непосредственное контактирование свариваемых материалов без промежуточного шва. Для стыковки труб в котлостроении применяют контактную стыковую сварку; в компрессоростроении широко внедрена сварка трением роторов нагнетателей; все большее распространение находит диффузионная сварка.

При сварке разнородных сталей кроме общих положений свариваемости необходимо учитывать следующие дополнительные факторы, определяющие выбор сварочных материалов, способы, режим сварки и работоспособность изделия: 1) неоднородность состава металла шва за счет проплавления при сварке

основного металла другого легирования, чем наплавленный металл; 2) развитие в зоне сплавления (под зоной сплавления условно понимают область, включающую границу сплавления и непосредственно примыкающие к ней участки шва и околошовной зоны переменного состава разнородных материалов) малопрочных и хрупких прослоек переменного состава; 3) наличие остаточных напряжений в соединениях разного структурного класса, которые не могут быть сняты термической обработкой. Указанные факторы обусловливают развитую химическую, структурную и механическую неоднородность рассматриваемых сварных соединений.

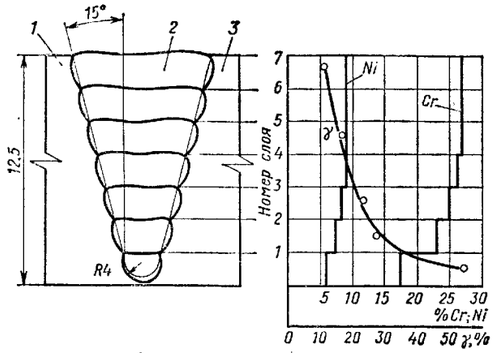


Рис. 1. Распределение легирующих элементов и доли участия основного металла в различных слоях многослойного стыкового шва при дуговой сварке перлитной стали с аустенитной:

1 — перлитная сталь типа 30ХМ; *2* — металл аустенитного шва типа Э-10Х25Н13Г2; *3* — аустенитная сталь типа 08Х18Н10; γ — доля участия основного металла

Неоднородность состава сварного шва. Химический состав различных слоев шва можно подсчитать, зная для каждого слоя долю участия в формировании шва наплавленного и проплавленного основного металлов. Эта доля меняется в зависимости от способов сварки и наплавки и их режимов [26]. Для контактной точечной, шовной сварки и сварки трением состав литого металла шва определяется соотношением проплавленных участков свариваемых сталей и зависит от их теплофизических свойств и режима сварки. Из-за разных условий проплавления состав отдельных слоев многослойных швов при дуговой сварке в соединениях разнородных сталей заметно меняется (рис. 1). Наибольшее отклонение от среднего состава наплавленного металла наблюдается в корневых слоях шва, доля участия проплавленного основного металла в которых достигает 50%. Поэтому в некоторых случаях для сварки корневых слоев применяют другие сварочные материалы. В основе выбора их легирования лежит принцип обеспечения требуемых состава и свойств металла корневого шва при большей, чем у остальных слоев, доле участия проплавленного основного металла другого состава.

Предварительная оценка фазового состава и структуры возможных переходных составов металла швов в зависимости от доли участия и составов основного и наплавляемого металлов может быть выполнена с помощью структурных диаграмм (рис. 2) [9, 10]. С их помощью при известных свойствах переходных участков можно определить предельно допустимую долю участия в шве основного металла и оценить возможность использования принятых составов сварочных материалов и способа сварки.

При ручной дуговой наплавке на перлитную сталь *А* (рис. 2, *а*) (доля участия основного металла 15—40%) состав первого слоя шва может существенно отличаться от состава наплавляемого металла. Если наплавку проводят высокохромистыми электродами состава *В*, то наплавленный металл первого слоя (область составов *и—к*), как и наплавляемый (электродный) металл, имеет мартенситную структуру с пониженным содержанием хрома, что резко снижает его технологическую прочность. При наплавке электродами типа Э-07Х20Н9 (состав *Б*) с малым запасом аустенитности первый слой (состава *в — г*) будет иметь неблагоприятную аустенитно-мартенситную структуру с низкими пластическими свойствами. Если использовать электроды типа Э-10Х25Н13С2 (состав *Г*), то первый слой (составы

д—е) имеет благоприятную аустенитно-ферритную структуру, а если использовать электроды типа Э-11Х15Н25М6АГ2 (состав *Д*) — то однофазную аустенитную (составы *ж—з*). При электронно-лучевой сварке стали типа 14Х17Н2 со сталью 12Х18Н10Т без использования промежуточной вставки фазовый состав металла шва находится в интервале составов, определяемых линией, соединяющей эти две стали (рис. 2, *б*). При возможных долях участия рассматриваемых металлов в формировании шва шов будет иметь аустенитно-мартенситную структуру, что при большой жесткости соединения может привести к трещинам. Если между

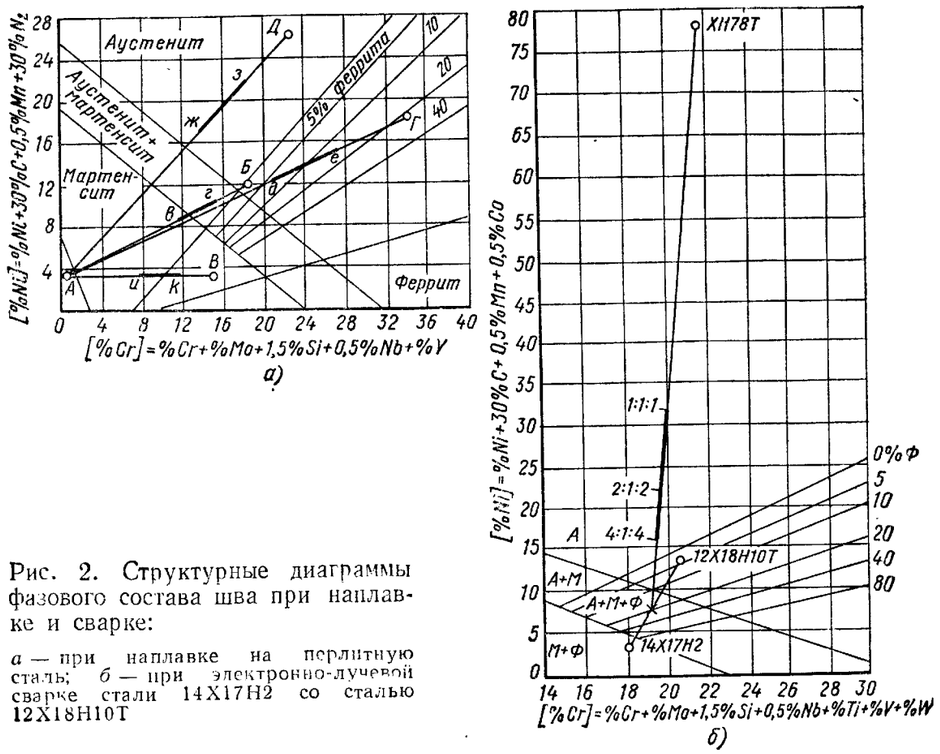


Рис. 2. Структурные диаграммы фазового состава шва при наплавке и сварке:

а — при наплавке на перлитную сталь; *б* — при электронно-лучевой сварке стали 14Х17Н2 со сталью 12Х18Н10Т

свариваемыми поверхностями ввести расплавляемую вставку из высоконикелевого сплава типа ХН78Т, то шов будет аустенитным с содержанием в нем никеля, меняющимся в зависимости от доли участия в нем металла вставки.

В пределах одного слоя химический состав металла шва достаточно однороден (рис. 3), что подтверждает имеющиеся представления об энергичном перемешивании сварочной ванны. Для отдельных способов контактной сварки, как, например, при точечной сварке разнородных сталей, когда перемешивание сварочной ванны идет менее интенсивно, наблюдается заметная разница в составе разных участков шва.

Зона сплавления сварных соединений. При выборе сварочных материалов и оценке работоспособности рассматриваемых сварных соединений особое внимание должно уделяться зоне сплавления (разнородных по составу) основного металла и шва при сварке плавлением и свариваемых материалов при сварке давлением. Зона сплавления может стать вероятным участком развития хрупких, коррозионных или усталостных разрушений. Среди процессов, определяющих

строение и свойства этой зоны, наибольшее значение имеют совместные кристаллизация разнородных материалов и развитие в ней диффузионных прослоек переменного состава.

При однородности состава в пределах одного слоя шва, вблизи границы сплавления выявляется «кристаллизационная» прослойка, характеризующаяся изменением содержания входящих в нее элементов от состава основного металла к составу металла шва. Образование этих прослоек обусловлено условиями кристаллизации металла шва на основном металле (подложке) другого состава. Их протяженность в зависимости от способа и режима сварки колеблется в пределах 0,05—0,6 мм. В соединениях, выполненных методами сварки давлением и характеризующихся контактом свариваемых элементов без промежуточного расплавляемого металла, например при контактной стыковой сварке, кристаллизационные прослойки отсутствуют.

Структура и свойства кристаллизационных прослоек зависят от сочетания составов основного металла и шва. В соединениях сталей одного структурного класса или перлитных сталей с высокохромистыми коррозионно-стойкими сталями свойства кристаллизационных прослоек являются промежуточными между свойствами основного металла и металла шва и не влияют на работоспособность конструкции. В отличие от этого в зоне сплавления наиболее распространенных сварных соединений перлитных сталей с аустенитным швом кристаллизационные прослойки, содержащие 3—12% Cr и 2—7% Ni, имеют структуру высоколегированного мартенсита и являются хрупкими.

Ширина хрупких мартенситных прослоек зависит от запаса аустенитности металла шва и становится наибольшей при использовании электродов типа Э-07Х20Н9 (x_1 на рис. 3). С повышением содержания никеля в шве ширина прослоек заметно снижается, и при его количестве более 35% прослойки не выявляются (рис. 4). При сварке с подогревом протяженность хрупких прослоек расширяется.

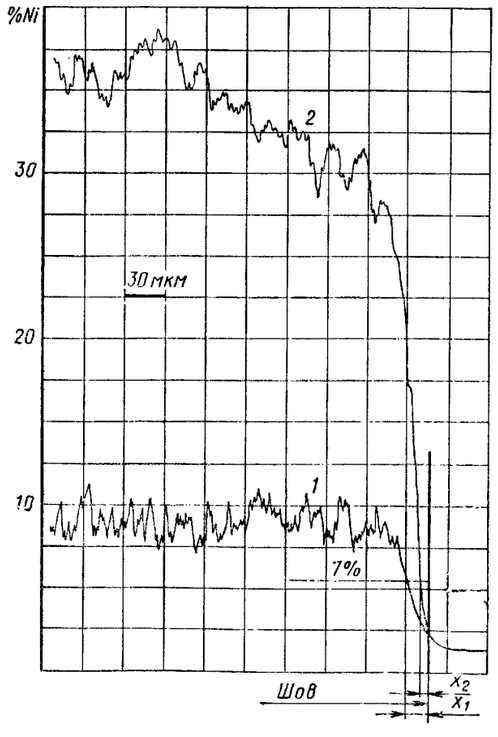


Рис. 3. Изменение содержания никеля в зоне сплавления перлитной стали с аустенитным швом:

1 — металл шва Э-07Х20Н9; *2* — металл шва на никелевой основе; x_1, x_2 — ширина кристаллизационных хрупких прослоек

На структуру и свойства зоны сплавления рассматриваемых соединений влияют «диффузионные» прослойки, вызванные миграцией углерода на линии раздела в более легированную составляющую соединения. Развитие этого процесса приводит к образованию обезуглероженной прослойки со стороны менее легированной составляющей и науглероженной — со стороны более легированной. Наибольшее развитие прослойки получают в сварных соединениях углеродистых сталей с высоколегированными аустенитными или ферритными сталями с повышенным содержанием хрома и других энергичных карбидообразующих

элементов во время термической обработки или в процессе высокотемпературной эксплуатации. Непосредственно после сварки их интенсивность мала.

По своему механизму рассматриваемый процесс относится к процессам диффузии в многокомпонентных системах, направление и скорость которых определяются не градиентом концентрации элементов (в данном случае углерода) на границе раздела, а градиентом химического потенциала системы — ее активностью. В данном случае он обусловлен разной термодинамической активностью карбидов в контактируемых материалах и связан с реакцией образования на границе раздела со стороны легированной составляющей устойчивых специальных карбидов (марганца, хрома, молибдена, вольфрама, ванадия, ниобия и титана) за счет углерода, поступающего из нелегированной составляющей, где он связан в сравнительно малоустойчивом карбиде цементитного типа. По существующей классификации этот процесс относится к процессам реактивной (реакционной) диффузии [10].

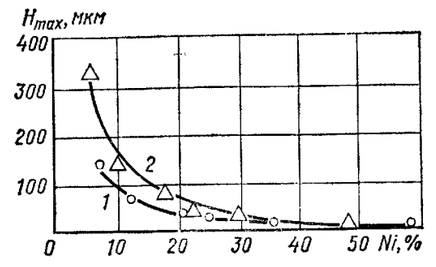


Рис. 4. Влияние содержания никеля в металле аустенитного шва на ширину хрупких кристаллизационных прослоек в зоне сплавления с перлитной сталью:

1 — без подогрева; *2* — подогрев до 500° С

Распределение углерода в зоне сплавления меняется в зависимости от температуры нагрева. При термической обработке типа отжига (выше точки Ac_3), когда растворимость углерода в аустените велика, со стороны углеродистой стали наблюдается постепенное снижение концентрации углерода, а со стороны легированной составляющей — ее повышение с разрывом непрерывности на границе раздела (рис. 5, *а*). При температурах ниже точки Ac_1 для углеродистой стали при ничтожной растворимости углерода в феррите, со стороны углеродистой стали выявляется полностью обезуглероженная прослойка, а со стороны легированной

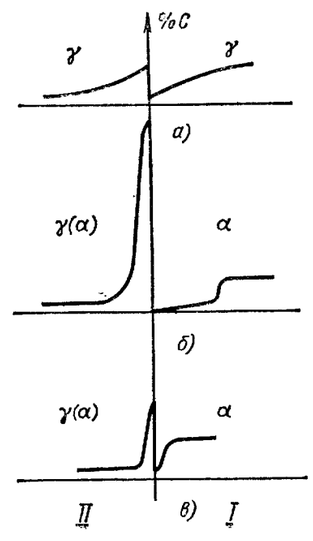
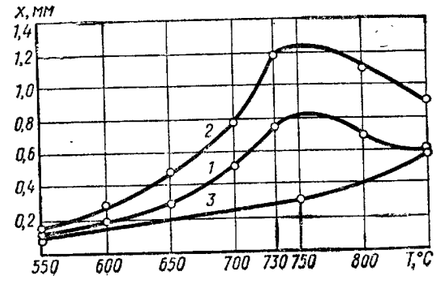


Рис. 5. Распределение углерода в диффузионных прослойках зоны сплавления сварного соединения углеродистой (*I*) и легированной (*II*) стали в зависимости от температуры выдержки:

а — выше точки Ac_3 (для углеродистой стали); *б* — ниже точки Ac_1; *в* — ниже 500° С

Рис. 6. Влияние температуры отпуска при выдержке 5 ч на ширину диффузионных прослоек в зоне сплавления углеродистой стали со сталью 12Х18Н10Т:

1 и *2* — обезуглероженная прослойка в сталях 20 и 10 соответственно; *3* — науглероженная прослойка в стали 12Х18Н10Т



составляющей — науглероженная прослойка с содержанием до 1,5—2,0% С (рис. 5, *б*). При низких температурах нагрева (ниже 500 °С для углеродистой стали) полностью обезуглероженные прослойки обычно не образуются, что может быть связано с очень низкой скоростью диффузии углерода в легированной составляющей вблизи границы раздела (рис. 5, *в*).

Фазовый состав легированной составляющей соединения не меняет характера процесса, а влияет лишь на его интенсивность. На направление процесса не влияет и какой частью сварного соединения — основным металлом или швом являются входящие в него составляющие. Направление и интенсивность процесса определяются лишь разницей в содержании карбидообразующих элементов в свариваемых материалах и температурно-временными условиями нагрева.

В соответствии с общими закономерностями диффузии рост ширины обезуглероженных и науглероженных прослоек подчиняется экспоненциальной зависимости от температуры и параболической во времени. Их расчет затруднен из-за недостаточности сведений об активности углерода в сталях. Имеются отдельные попытки такого расчета применительно к биметаллу с плакирующим слоем. Если известно изменение ширины прослоек после относительно кратковременных выдержек при температурах отпуска, то с помощью параметрической зависимости можно определить их после длительной эксплуатации при меньших температурах [12].

Наибольшего развития обезуглероженные прослойки достигают после нагрева при температурах, близких к нижней критической точке Ac_1 (рис. 6). Дальнейший рост температуры вызывает уменьшение их ширины в связи с изменением фазового состава нелегированной стали. Чем меньше содержание углерода в низколегированной стали, тем больше ширина обезуглероженной прослойки, однако разница в свойствах прослойки и основного металла при этом меньше.

При использовании в качестве менее легированной составляющей сварного соединения низколегированной стали, содержащей такие элементы, как хром, молибден и особенно ванадий, ниобий или титан, протяженность диффузионных прослоек в зоне сплавления заметно снижается. При содержании в менее легированной стали 5% Cr и более прослойки мало заметны и их влияние можно не учитывать. Снижается ширина прослоек и в контакте низкоуглеродистой стали с низколегированной при содержании в последней менее 5% Cr.

В связи с заметным влиянием диффузионных прослоек на прочность сварных соединений актуальной является разработка мер по уменьшению интенсивности их развития. В соединениях перлитной стали с аустенитной или при сварке закаливающихся сталей аустенитными электродами такой эффективной мерой является использование сварочных материалов с повышенным содержанием никеля (рис. 7). Это является рациональным и применительно к устранению хрупких кристаллизационных прослоек.

Для уменьшения ширины диффузионных прослоек можно также рекомендовать: а) предварительную облицовку кромок перлитной стали более стабильными перлитными швами; в) введение промежуточных конструктивных элементов из более стабильных перлитных сталей; в) ограничение температуры эксплуатации в зоне сварного соединения; г) отказ от отпуска сварного соединения или снижение его температуры.

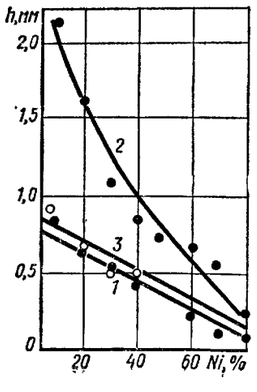


Рис. 7. Влияние содержания никеля в аустенитном шве (15% Cr) на ширину диффузионных прослоек в зоне сплавления с углеродистой сталью (0,36% С) после высокотемпературных выдержек:

1 — обезуглероженная прослойка в углеродистой стали 550° С, 1000 ч; *2* — то же, 650° С, 1000 ч; *3* — науглероженная прослойка в аустенитном шве 650° С, 1000 ч

Свойства сварных соединений

Механические свойства и жаропрочность. Стали различных классов имеют близкие модули упругости. Поэтому при нагружении в упругой стадии сварные соединения разнородных сталей можно рассматривать как однородное тело. Их свойства при разрушающих нагрузках зависят от направления приложения усилий. Если соединение нагружается поперек шва, то его свойства определяются свойствами наименее прочных участков основного металла или шва. При приложении усилия вдоль шва прочность и пластичность соединения являются промежуточными между свойствами входящих составляющих. При наличии в них хрупких участков возможно преждевременное разрушение изделия.

При оценке свойств рассматриваемых сварных соединений особого внимания заслуживает вероятность преждевременных хрупких разрушений в зоне сплавления. В соединениях сталей одного структурного класса между собой такие разрушения не характерны и могут возникать преимущественно при высоких температурах в условиях ползучести. В наибольшей степени они проявляются в соединениях разных структурных классов и прежде всего в соединениях перлитной, мартенситной или ферритной стали с аустенитной, когда в зоне сплавления образуются развитые хрупкие кристаллизационные и диффузионные прослойки.

При использовании в таких соединениях в качестве менее легированной составляющей перлитной малопрочной стали (например, низкоуглеродистой) появление в зоне сплавления развитых кристаллизационных прослоек (при содержании никеля в аустенитном шве менее 25%) не приводит в исходном состоянии после сварки к хрупким разрушениям в зоне сплавления. Если сваривать сталь повышенной прочности, то и в исходном состоянии после сварки возможны хрупкие разрушения в зоне сплавления только из-за образования кристаллизационных прослоек. Переход к таким разрушениям приводит к повышению переходной температуры хрупкости соединения $T_{пер}$ (кривая *1* на рис. 8) выше температуры эксплуатации ($T_э$). Отпуск после сварки или высокотемпературная выдержка, приводя к дополнительному развитию в зоне сплавления диффузионных прослоек, усиливают склонность сварных соединений к хрупким разрушениям, способствуя дополнительному повышению переходной температуры хрупкости (кривые *2* и *3*). В этих случаях таким разрушениям подвержены и соединения малопрочной перлитной стали с аустенитной. Использование сварочных материалов с повышенным запасом аустенитности типов Э-11Х15Н25М6АГ6, Э-27Х15Н35В3Г2Б2Т и особенно материалов на никелевой основе уменьшает вероятность хрупких разрушений в зоне сплавления как в исходном, так и в отпущенном состоянии.

Диффузионные прослойки могут влиять и на поведение рассматриваемых сварных соединений при действии коррозии под напряжением в растворах щелочей и нитратов. Чем больше развиты эти прослойки, тем меньше время до разрушения образцов, находящихся в коррозионных средах. Разрушение при этом происходит по обезуглероженной прослойке.

При развитии диффузионных прослоек усталостная прочность сварных соединений снижается с преимущественным переходом разрушений в зону сплавления. Она снижается также и при неблагоприятном распределении поля остаточных напряжений [14].

Жаропрочность сварных соединений разнородных сталей зависит от рабочих температур, сочетания свариваемых сталей и степени развития диффузионных прослоек в зоне сплавления. При умеренных температурах (ниже 400 °С для перлитных сталей) и недлительной эксплуатации на стадии внутризеренного разрушения длительная прочность рассматриваемых сварных соединений близка к длительной прочности менее прочного основного металла (кривые на рис. 9, при температуре T_1). Развитие диффузионных прослоек в этом случае не снижает длительную прочность соединения, поскольку при внутризеренном разрушении жесткость напряженного состояния в малопрочной прослойке будет затруднять деформации сдвига и тем способствовать упрочнению прослойки. При большей

температуре (T_2) и длительности испытания на стадии хрупкого межзеренного разрушения зона сплавления, наоборот, является наиболее вероятным очагом разрушения. Уровень длительной прочности сварных соединений в этих условиях может меняться.

При отсутствии диффузионных прослоек длительная прочность сварных соединений разнородных сталей одного структурного класса и на стадии межзеренного разрушения определяется соответствующими ее значениями для однородных соединений менее прочных сталей. В соединениях сталей разных структурных классов она может дополнительно снижаться (кривая *2* при температуре T_2) с разрушением непосредственно по границе раздела свариваемых материалов.

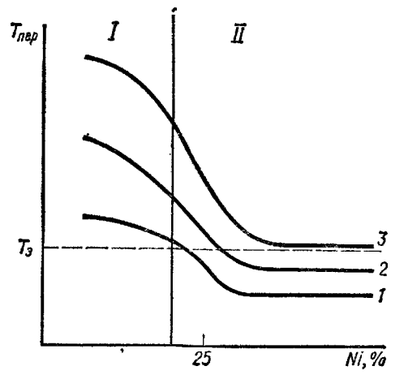


Рис. 8. Влияние содержания никеля в аустенитном шве (15—18% Cr) на переходную температуру хрупкости в зоне сплавления соединений перлитной стали повышенной прочности с аустенитной:

1 — исходное состояние; *2*, *3* — отпуск длительностью t_1 и t_2 ($t_2 > t_1$); *I* — область хрупких разрушений в зоне сплавления при нормальной температуре; *II* — область вязких разрушений при нормальной температуре

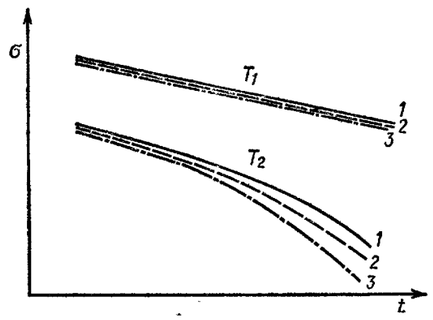


Рис. 9. Длительная прочность сварных соединений разнородных сталей (схема):

1 — основной металл; *2* — сварное соединение разных структурных классов при отсутствии диффузионных прослоек; *3* — сварное соединение с развитыми диффузионными прослойками

Заметно снижается дополнительно длительная прочность при развитии в зоне сплавления диффузионных прослоек (кривая *3*) с переходом разрушения в малопрочную диффузионную прослойку. Такое снижение наблюдается в соединениях сталей как разных, так и одного структурного классов.

Остаточные напряжения. Основными источниками возникновения внутренних напряжений при сварке разнородных и однородных сталей являются неравномерность температурного поля и жесткость соединяемых деталей. Поэтому в исходном состоянии остаточные напряжения распределяются в них одинаково [10]. Различие характеристик температурного расширения свариваемых сталей незначительно влияет на распределение поля остаточных напряжений непосредственно после сварки. В связи с этим сварные соединения из разнородных сталей, не подвергавшиеся отпуску после сварки и работающие при нормальной или сравнительно умеренных температурах (до 200—250 °С), можно рассматривать как обычные сварные конструкции из однородных сталей с неснятыми сварочными напряжениями.

При отпуске сварных соединений из сталей одного структурного класса, на стадии нагрева и выдержки при заданной максимальной температуре, остаточные напряжения снимаются за счет прохождения процесса релаксации. Последующее охлаждение из-за близости коэффициентов линейного расширения в пределах одного структурного класса сталей не вызовет появления дополнительных остаточных напряжений. Поэтому в указанных соединениях остаточные напряжения после отпуска можно не учитывать.

В сварных соединениях сталей разного структурного класса на стадии нагрева и высокотемпературной выдержки также произойдет снятие сварочных остаточных напряжений. Однако при последующем охлаждении в соединениях возникнут новые внутренние напряжения, обусловленные разностью характеристик линейного расширения свариваемых материалов. В сварных соединениях аустенитной стали с перлитной охлаждение после отпуска вызывает в аустенитной части появление остаточных напряжений растяжения, а в перлитной — уравновешивающих их напряжений сжатия. В сварных соединениях перлитной стали с высокохромистой мартенситно-ферритного класса в перлитной части возникнут напряжения растяжения, а в высокохромистой — сжатия. Аналогичные закономерности распределения остаточных напряжений наблюдаются и в наплавленных изделиях (рис. 10).

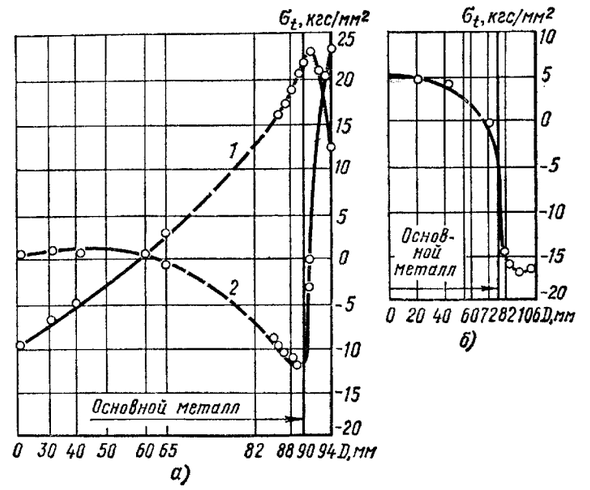


Рис. 10. Эпюры остаточных тангенциальных напряжений в валах из углеродистой стали с аустенитной и мартенситно-ферритной наплавками:

а — наплавка проволокой Св-06Х18Н9Т; *б* — наплавка проволокой Св-12Х13; отпуск 620° С, 2 ч; *1* — исходное состояние; *2* — после термической обработки

Для изделий, работающих при высоких температурах и, особенно, подверженных действию теплосмен, особый интерес представляет определение закономерностей распределения полей временных и остаточных напряжений во время циклического воздействия температур. При расчете за начальное состояние, свободное от напряжений, может быть принято состояние максимального нагрева при отпуске (650 °С). При охлаждении изделия от этой температуры осуществляется процесс его нагружения остаточными напряжениями. В отдельных случаях последние еще до полного охлаждения изделия могут достигнуть предела текучести материала, поэтому дальнейшее остывание изделия связано с развитием поля пластических деформаций в первую очередь вблизи зоны сплавления. Возможно также развитие обратных по знаку пластических деформаций во время нагрева изделия от 20 °С до рабочих температур. В этом случае теплосмены могут приводить к накоплению местных пластических деформаций и преждевременному разрушению изделия.

Температура, при которой в процессе охлаждения от температуры отпуска $T_{отп}$ в изделии возникнут пластические деформации,

$$T = T_{отп} - \frac{a\sigma_{т_1}}{E(\alpha_1 - \alpha_2)}.$$

Температура, при нагреве до которой от начальной температуры T_0, равной 20 °С, в изделии возникнут пластические деформации обратного, чем при охлаждении, знака,

$$T_р = T_0 + 2a\frac{\sigma_{т_1}}{E(\alpha_1 - \alpha_2)},$$

где $\sigma_{т1}$ — предел текучести менее прочной стали, кгс/мм²; α_1 и α_2 — коэффициенты линейного расширения свариваемых сталей; a — коэффициент, зависящий от типа соединения ($a = 2$ для стыка труб, расположенного вдали от жесткости; $a = 0{,}5$ — для стыка труб, расположенного на участке наибольшей жесткости, и $a = 1{,}07$ — для композитного диска).

Для соединений из разнородных сталей, работающих до 200—250 °С, поле остаточных напряжений можно не рассчитывать. Для исключения влияния поля остаточных напряжений, особенно при усталостном режиме работы изделия, можно применять поверхностный наклеп [14].

При более высоких температурах эксплуатации дополнительно к основному расчету необходимо рассчитывать деформации от суммарного действия рабочих, остаточных и температурных напряжений [10]. Основное внимание нужно уделять возможности развития в изделии знакопеременных пластических деформаций во время циклических изменений температуры и снижения напряжений изгиба, действуюших нормально к шву.

При проектировании ответственных трубчатых конструкций из сталей разного структурного класса рекомендуется: а) располагать комбинированные соединения в зонах пониженных температур, например на необогреваемых участках поверхностей нагрева котлов; б) применять, как правило, стыковые соединения; в) при стыковке труб с различной толщиной стенки комбинированный стык располагать на участке большей толщины с введением дополнительного переходного элемента; г) при необходимости размещения комбинированного стыка патрубка вблизи участка повышенной жесткости (например, у обечайки сосуда) размещать его на расстоянии не менее $1{,}3\sqrt{Rh}$, где R — средний радиус патрубка; h — толщина его стенки.

Сварка разнородных сталей одного структурного класса

Соединения из перлитных сталей. При сварке перлитных сталей разного легирования следует использовать сварочные материалы, применяемые для менее легированной стали (табл. 3). Если разница в легировании велика (I и V группы), то для уменьшения диффузионных прослоек при отпуске или высокотемпературной эксплуатации рекомендуются материалы промежуточного легирования.

При ручной дуговой сварке рекомендуется применять электроды с основным покрытием. Электроды с кислым и целлюлозным покрытиями не рекомендуются из-за опасности образования холодных трещин в корневом слое и слоях, примыкающих к более легированной стали. Технологические режимы сварки, и прежде всего температуру подогрева, надо выбирать близкими к требуемым для более легированной стали. При сварке массивных изделий в отдельных случаях целесообразно исключить подогрев или снизить его температуру путем введения предварительной облицовки кромки со стороны более легированной стали электродами, приведенными в табл. 3. При относительно небольшой разнице в легировании (I и IV группы) рабочая температура соединения может быть допущена близкой к предельной для менее легированной стали. При большей разнице в легировании ее желательно снизить на 50—100 °С или ввести переходный элемент из стали промежуточного легирования.

Сварные соединения сталей I группы со сталями II, III и IV групп при отсутствии специального требования можно не подвергать термической обработке.

Соединения, в которые входит хромомолибденованадиевая сталь, следует отпускать при 680—700 °С. При проектировании разнородные стыки желательно располагать вне зоны действия высоких напряжений изгиба, особенно в условиях эксплуатации при высоких температурах. Подобные стыки труб следует размещать вдали от корпусов арматуры и обечайки сосудов при отсутствии концентраторов, вызванных изменением формы сечения.

3. Сварочные материалы

Группы свариваемых сталей (см. табл. 1)	Тип электродов для ручной дуговой сварки	Проволока для автоматической сварки под флюсом	Проволока для сварки в углекислом газе
I и II; I и III; I и IV; II и IV	Э42А, Э50А	Св-08А	Св-08ГС, Св-08ГА, Св-08Г2С
I и V, II и V, IV и V	Э-09МХ, Э-09Х1М	Св-08ХМ	Св-08ХГСМТ
VI и VIII	ЭФ-12Х13, ЭФ-12Х11НМФ, Э-10Х25Н13Г2	Св-0Х14НТ	Св-0Х14НТ
VII и VIII, VI и VII	Э-10Х25Н13Г2, Э-08Х24Н6ТАМФ, Э-10Х20Н9Г6С	Св-06Х24Н6ТАМФ	—

Соединения из высокохромистых сталей мартенситного, ферритного и аустенитно-ферритного классов. Выбор электродных материалов для соединения из указанных сталей определяется прежде всего требованиями получения швов без трещин и отсутствия хрупких кристаллизационных прослоек. Заметного развития диффузионных прослоек в этих соединениях не наблюдается. При сварке 12%-ных хромистых коррозионно-стойких и жаропрочных сталей (групп VI—VIII) между собой можно применять сварочные материалы для любой из этих сталей. При сварке под флюсом или в углекислом газе используют сварочную проволоку типа Св-0Х14НТ. Сварку нужно производить с подогревом для более легированной стали, имеющей, как правило, и повышенное содержание углерода. При использовании аустенитных электродов (типа Э-10Х25Н13Г2) температура подогрева может быть снижена на 150—200 °С. После сварки обязателен отпуск. Соединения малой жесткости, сваренные аустенитными электродами, можно не отпускать. Из-за большой разницы в коэффициентах линейного расширения высокохромистой стали и аустенитного шва, в изделии и после термической обработки будут иметься высокие остаточные напряжения.

При сварке 12%-ных хромистых коррозионно-стойких и жаропрочных сталей с высокохромистыми ферритными и аустенитно-ферритными сталями следует применять сварочные материалы аустенитно-ферритного класса. В отличие от ферритных швов аустенитно-ферритные не склонны к росту зерна и имеют высокую пластичность после сварки. Температуру подогрева следует выдерживать близкой к применяемой для однородных соединений 12%-ной хромистой стали. После сварки необходим отпуск в интервале температур 700—750 °С с ускоренным охлаждением для устранения опасности проявления хрупкости при 475 °С. Так как коэффициенты линейного расширения 12%-ных хромистых мартенситных сталей и ферритно-аустенитных швов близки между собой, то отпуск приводит к снятию остаточных напряжений. Он повышает также коррозионную стойкость сварного соединения.

Соединения из аустенитно-ферритных, аустенитных сталей и сплавов на никелевой основе. При выборе сварочных материалов для сварки сталей и сплавов указанного сочетания необходимо оценить склонность аустенитных швов к обра-

зованию горячих трещин при относительно небольших отклонениях их состава от оптимального. Процессы диффузионного перераспределения углерода в зоне сплавления для этих соединений можно не учитывать.

Соединения разного легирования, входящие в группу IX, можно сваривать наиболее технологичными аустенитно-ферритными электродами и проволоками (табл. 4). Если конструкции после сварки подвергают термической обработке, то следует применять электроды, позволяющие регулировать содержание феррита в металле шва (Э-07Х20Н9, Э-08Х19Н10Г2Б и Э-07Х19Н11Г2М2Ф).

4. Сварочные материалы

Группы свариваемых сталей	Тип электродов для ручной дуговой сварки	Проволока для автоматической сварки под флюсом
IX	Э-04Х20Н9*, Э-07Х20Н9, Э-08Х19Н10Г2Б, Э-08Х20Н9Г2Б*, Э-09Х19Н11Г3М2Ф, Э-10Х25Н13Г2Б*	Св-04Х19Н9, Св-04Х19Н11-М3
IX и X, IX и XI, IX и XII	Э-09Х15Н25М6Г2Ф, Э-27Х15Н35В3Г2Б2Г, Э-08Х14Н65М15В4Г2, Э-08Н60Г7М7Т	Св-30Х15Н35В3Б3Т, Св-06Х15Н60М15

* Для сварки конструкций, не подвергающихся термической обработке.

Если стали группы IX сваривают с жаропрочными аустенитными сталями и сплавами групп X, XI или XII, то аустенитно-ферритные электроды использовать нельзя из-за неизбежности повышения в шве никеля, образования в нем стабильной аустенитной структуры и появления вследствие этого горячих трещин. В таком случае необходимо применять сварочные материалы, обеспечивающие однофазную аустенитную или аустенитно-карбидную структуру металла шва при дополнительном легировании его элементами, способствующими повышению стойкости против горячих трещин. Хорошие результаты обеспечиваются и при сварке этого сочетания материалов электродами на никелевой основе марок 08Х14Н65М15В4Г2 и 08Н60Г7М7Т. Сварка этих сочетаний сталей и сплавов выполняется без подогрева. Выбор термической обработки данных сварных соединений определяется маркой стали или сплава, типом конструкции и условиями ее работы. При сварке термически неупрочняемых сталей группы IX, при отсутствии требований к снятию остаточных напряжений и коррозионной стойкости, при работе изделия в интервале умеренных температур термическая обработка может не производиться. Если по условиям изготовления и эксплуатации остаточные напряжения должны быть сняты, то достаточна стабилизация при температурах 800—900° С. Для конструкций, работающих при высоких температурах, предпочтительным видом термической обработки является аустенизация при 1100—1150° С.

Сварка сталей разного структурного класса

Соединения из перлитных сталей с высокохромистыми мартенситными, ферритными и аустенитно-ферритными сталями. Для сварных соединений перлитных сталей с высокохромистыми необходимо учитывать возможность появления холодных трещин при сварке и развития диффузионных прослоек при отпуске или высокотемпературной эксплуатации. При выборе сварочных материалов нужно обращать внимание на недопустимость образования хрупких переходных участков шва в зонах интенсивного перемешивания со сталью, разнородной по составу с наплавленным металлом.

Перлитные стали с 12%-ными хромистыми сталями сваривают перлитными электродами или проволоками (табл. 5). В этом случае обеспечиваются удовлетворительные прочность и пластичность переходных слоев шва с содержанием в них до 5% Cr и высокая длительная прочность соединения в целом. По условию максимального снижения диффузионных прослоек электроды и сварочные проволоки имеют несколько большее легирование, чем менее легированная сталь. При больших толщинах свариваемых элементов сварочными материалами, рекомендуемыми в табл. 5, можно проводить лишь облицовку кромок со стороны 12%-ной хромистой стали, а заварку основного шва выполнять электродами, состав которых близок к составу менее легированной стали.

5. Сварочные материалы

Группы свариваемых сталей	Тип электродов для ручной дуговой сварки	Проволока для автоматической сварки под флюсом	Проволока для сварки в углекислом газе
I и VI, I и VIII	Э-09Х1М	Св-08ХМ	Св-08ХГСМА Св-08ХГСМФА
IV и VI, IV и VIII	Э-09Х1МФ	Св-08ХМФА	
I и VII, II и VII	Э-08Х24Н6ТАМФ,	—	
III и VII, IV и VII	Э-10Х25Н13Г2	—	

Термический режим сварки (подогрев) необходимо выбирать по высоколегированной составляющей. При работе в высокотемпературных установках сварные стыки нужно располагать вдали от участков повышенной жесткости, на утолщенных участках при отсутствии значительных дополнительных напряжений изгиба. Температуру эксплуатации в районе стыка желательно снизить по сравнению с предельной для 12%-ной хромистой стали. При невозможности такого снижения необходимо вводить переходный элемент из более стабильной перлитной стали либо осуществлять предварительную облицовку кромок со стороны 12%-ной хромистой стали последовательно электродами типов Э-09Х1МФ или Э-10Х3М1ФБ, затем Э-09Х1М. Отпуск проводят по режимам, близким к режимам для 12%-ной хромистой стали.

При сварке перлитных сталей с высокохромистыми ферритными и аустенитно-ферритными (группы VII) применять электроды перлитного класса нежелательно из-за неизбежного чрезмерного легирования переходных участков шва и опасности образования в них трещин. В данном случае целесообразно использовать электроды аустенитно-ферритного класса, обеспечивающие достаточную стабильность свойств металла шва в переходных участках у перлитной стали. Можно также применять и аустенитные электроды, однако при этом неизбежна значительная неоднородность соединения, что при работе в области высоких температур может привести к преждевременному разрушению изделия.

Соединения из перлитных, мартенситных и ферритных сталей с аустенитными сталями и сплавами на никелевой основе. В данных соединениях в наибольшей степени выражена химическая, структурная и механическая неоднородность. Выбор сварочных материалов для них и оценка эксплуатационной надежности требуют учета большого числа факторов. При сварке сталей указанного сочетания в основном используют аустенитные сварочные материалы. Перлитные материалы для этой цели не применяют из-за неизбежности получения при проплавлении аустенитного основного металла хрупких слоев шва, имеющих структуру мартенсита и обладающих высокой склонностью к образованию трещин.

Номенклатура аустенитных сварочных материалов обширна (табл. 6). Для сварки перлитных сталей с аустенитными термически неупрочняемыми сталями

группы IX в основном используют наиболее технологичные аустенитно-ферритные электроды и проволоки с запасом аустенитности, обеспечивающим сохранение требуемых свойств металла шва при условии возможного проплавления перлитного основного металла. К ним относятся электроды типов Э-10Х25Н13Г2, Э-07Х19Н11Г3М2Ф и сварочные проволоки, допускающие разбавление шва перлитным основным металлом до 30%. Электроды типа Э-07Х20Н9 и подобные им сварочные проволоки в данном случае применять нельзя, так как при разбавлении с перлитной сталью свыше 10% шов будет иметь аустенитно-мартенситную структуру и в нем могут появляться трещины.

6. Сварочные материалы

Группы свариваемых сталей	Тип электродов	Проволока для автоматической сварки под флюсом
I и IX, II и IX, III и IX, IV и IX, V и IX, VI и IX, VII и IX, VII и IX, VIII и IX	Э-10Х25Н13Г2, Э-10Х20Н9Г6С, Э-11Х15Н25М6АГ2, Э-27Х15Н35В3Г2Б2Т, Э-08Н60Г7М7Т, Э-08Х14Н65М15В4Г2	Св-07Х25Н13, Св-07Х25Н12Г2Т, Св-08Х20Н9Г7Т, Св-06Х15Н60М15
I и X (XI, XII) II и X (XI, XII), III и X (XI, XII), IV—X (XI, XII), V и X (XI, XII)	Э-11Х15Н25М6АГ2. Э-27Х15Н35В3Г2Б2Т, Э-08Н60Г7М7Т Э-08Х14Н65М15В4Г2	—

Если сваривают жесткие сварные узлы из перлитной и мартенситной высокопрочной стали групп III, VI и VII с аустенитной сталью, то по условию устранения возможности отрывов по зоне сплавления из-за развития в ней хрупких кристаллизационных прослоек рекомендуются материалы с однофазной аустенитной структурой шва за счет повышенного содержания никеля и наиболее распространенные электроды типа Э-11Х15Н25М6АГ2. Корневые слои, в которых разбавление может достигать 50%, по условию исключения возможности горячих трещин целесообразно заваривать более легированными электродами с повышенным содержанием молибдена. Электродные материалы с однофазной аустенитной структурой шва рекомендуется применять и при сварке перлитных сталей с аустенитными жаропрочными сталями и сплавами на никелевой основе групп X—XII.

Для сварных узлов, эксплуатирующихся при высоких температурах в условиях ползучести, предпочтительным является использование сварочных материалов с повышенным содержанием никеля типа Э-27Х15Н35В3Г2Б2Т и особенно электродов на никелевой основе, например типа Э-08Н60Г7М7Т, что способствует уменьшению развития диффузионных прослоек в зоне сплавления и благодаря почти одинаковым коэффициентам линейного расширения перлитной стали и высоконикелевого шва повышает эксплуатационную надежность изделия в условиях теплосмен. Корпуса энергетической арматуры из хромомолибденованадиевой и хромомолибденовой стали групп IV и V при ремонте заваривают высоконикелевыми электродами без последующей термической обработки [11]. Возможна также облицовка свариваемых кромок высоконикелевыми электродами с заполнением основной разделки шва металлом с меньшим содержанием никеля. При проектировании высокотемпературных сварных узлов из перлитных сталей с аустенитными необходимо предусматривать размещение сварных стыков вне зоны действия высоких напряжений изгиба или местное утолщение участка стыка для уменьшения этих напряжений.

Термическая обработка не снижает остаточных напряжений, поэтому в соединениях из незакаливающейся при сварке перлитной стали, например низкоуглеродистой с аустенитной, ее можно не проводить. Если используют закаливающуюся при сварке перлитную или мартенситную сталь, то в жестких соединениях из разнородных сталей ее можно вводить по условию снятия закалки в околошовной зоне этих сталей. Вместо отпуска всего соединения узла можно проводить облицовку кромок со стороны закаливающейся стали аустенитными электродами и отпуск лишь облицованной детали. В этом случае термическая обработка всего соединения не требуется.

При термической обработке рассматриваемых сварных соединений необходимо учитывать возможность коробления конструкции в результате перераспределения поля остаточных напряжений [10]. Оно выражено в наибольшей степени при несимметричном расположении швов в изделии. При симметричном расположении швов коробление мало и его можно не учитывать.

СВАРКА РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Особенности сварки

Трудность сварки разнородных металлов и сплавов обусловлена тем, что они различаются физическими, механическими и физико-химическими свойствами (табл. 7), которые определяют как взаимодействие металлов между собой, так и их взаимодействие с вновь образующимися фазами.

Большинство пар свариваемых разнородных металлов или сплавов различается температурой плавления, плотностью, коэффициентами теплофизических свойств: коэффициентами линейного расширения, кристаллографическими характеристиками — типом решетки и ее параметрами. Тугоплавкие и химически активные титан, ниобий, тантал, молибден при нагреве активно взаимодействуют с водородом (при температуре выше 300° С), с азотом и кислородом (при температуре выше 600° С), что ухудшает их свойства и усложняет технологию сварки.

При ограниченной взаимной растворимости для основных комбинаций свариваемых металлов трудно избежать образования стойких интерметаллических фаз (табл. 8), обладающих большой твердостью и хрупкостью. В паре Fe—Al образуются соединения с микротвердостью 800—900 кгс/мм². Наиболее хрупкой фазой является Fe_2Al_5. В паре (при сварке стали типа 12Х18Н8 и алюминия) также образуются интерметаллиды NiAl и Ni_3Al, обладающие большой хрупкостью. Например, пластичность фазы Ni_3Al равна нулю, однако пластичность фазы NiAl может быть увеличена нагревом и гомогенизацией фазы при 1150° С в течение 48 ч, либо при 1315 °С в течение 6 ч, а также измельчением зерен этой фазы при добавке 0,5% Mo. Типовые прослойки интерметаллидов, получающиеся при сварке алюминия со сталью или никелем [1], показаны на рис. 11. Почти все пары металлов образуют хрупкие фазы, которые являются химическими соединениями и резко отличаются от соединяемых металлов по всем характеристикам. Так, фаза $FeAl_3$ обладает ромбической решеткой с параметрами: $a = 47{,}43$ Å; $b = 15{,}46$ Å; $c = 6{,}08$ Å, отличной от решетки Fe и Al; так же различаются свойства хрупких фаз и основного металла в других случаях.

Прочные связи в сварном соединении образуются за две стадии [21]: 1) подготовительную — сближение соединяемых металлов на расстоянии, при которых может возникнуть межатомное взаимодействие, достигаемое: а) в процессе смачивания твердой поверхности жидкой фазой; б) совместной пластической деформацией двух твердых веществ; в) диффузионными процессами; 2) конечную, когда определяющую роль играют квантовые процессы электронного взаимодействия, приводящие к образованию либо металлической связи (чистые металлы), либо к ковалентной связи (металлы, химические соединения, окислы). Для первой фазы

Атомный номер	13	22	26	28	29	30	41	42	73	23
Относительная атомная масса	26,98	47,90	55,85	58,71	63,55	65,37	92,91	95,95	180,95	50,95
Плотность, г/см³	2,7	4,51	7,87	8,9	8,94	7,13	8,6	10,2	16,6	6,1
Температура плавления, °С	660	1665	1535	1455	1083	419	2465	2622	2990	1920
Коэффициент теплопроводности (при 20 °С), кал/(см·с·°С)	0,57	0,036	0,18—0,22	0,22	0,94	0,27	0,12	0,34	0,13	0,07
Удельная теплоемкость (при 0—100 °С) кал/(г·°С)	0,217	0,13	0,11	0,11	0,092	0,091	0,06	0,065	0,036	0,12
Коэффициент линейного расширения при 0—100 °С, 10^6, 1/°С	23,5	8,3	11,7—12,3	13,0	16,5	33,0	7,1	5,2	6,6	8,3
Тип пространственной решетки	Кубическая гранецентрированная	Плотноупакованная гексагональная α-Ti	Кубическая объемноцентрированная	Кубическая гранецентрированная β-Ni	Кубическая гранецентрированная	Гексагональная плотноупакованная	Объемно-центрированная, кубическая			Пространственно-центрированная, кубическая
Параметры решетки	4,04	$a = 2,95$; $c = 4,68$; α-Ti	2,86	3,52	3,61	$a = 2,66$; $c = 4,94$	3,29	3,14	3,30	3,01
Наименьшее межатомное расстояние, Å	2,86	2,91	2,48	2,49	2,55	2,66	2,85	2,72	2,85	—
Твердость *HB*	17—25	140—200	80	60—70	40—50	20—30	90—120	190—200	80—120	65—180
Предел прочности, кгс/мм²	5—10	30—45	25—30	28—30	20—24	6,4	30—35	50—90	35—52	22—48
Предел текучести, кгс/мм²	3—5	20—35	12,0	14	7,5—15	1,0	15—17	35	—	До 44,0
Относительное удлинение, %	20—35	20—35	40—50	35—50	45—55	20	40—50	5—15	25—50	17—34
Модуль нормальной упругости, кгс/мм²	7100	11 210	21 000	20 500—23 000	11 500—12 600	5300	8700	28 000—31 800	18 800	12 600—13 300

Примечание. Механические свойства даны для технически чистых металлов в отожженном состоянии.

8. Пары свариваемых металлов и применяемые способы сварки

Соединяемые металлы или сплавы	Применяемые способы сварки		Образование	
	плавлением	давлением	растворов	интерметаллических соединений
Сталь и алюминий, его сплавы	Аргонодуговая, электронно-лучевая	Холодная, контактная, диффузионная, трением, взрывом	До 33% Al в α-Fe	$FeAl_3$; Fe_2Al_5; Fe_2Al_7; FeAl
Сталь и медь, ее сплавы	Аргонодуговая, по флюсу, электронно-лучевая, плазменная, электрошлаковая	Трением, взрывом, диффузионная	До 8% Cu в γ-Fe; до 1,4% Cu в α-Fe	—
Сталь и титан	Электронно-лучевая, аргонодуговая	Диффузионная, взрывом	0,5% Fe в α-Ti; до 25% Fe в β-Ti	FeTi; Fe_3Ti
Сталь и молибден		Диффузионная	До 6,7% Mo в α-Fe	FeMo; Fe_3Mo_2; Fe_7Mo_8
Сталь и ниобий			До 1,8% Nb в α-Fe; до 1% Nb в γ-Fe	FeNb; Fe_2Nb; Fe_5Nb_3
Сталь и ванадий			Непрерывный ряд	Образование карбидов V_nC_m
Сталь и тантал	Электронно-лучевая		Ограниченная растворимость	Fe_2Ta
Алюминий и медь	Аргонодуговая, по флюсу	Холодная, контактная, взрывом, диффузионная	До 9,8 Al в Cu	$CuAl_2$
Алюминий и титан		Диффузионная, трением	До 6% Al в α-T	TiAl; $TiAl_3$
Титан и тантал	Электронно-лучевая, аргонодуговая		Непрерывный ряд	—
Титан и медь			2,1% Cu в α-Ti; до 17% Cu в ß-Ti	Ti_2Cu; TiCu; Ti_2Cu_3; $TiCu_2$; $TiCu_3$

характерным этапом является физическое взаимодействие (этап *А* на рис. 12, *а*), а для второго этапа химическое взаимодействие (этап *Б* на рис. 12, *б*), длительность и условия протекания которых определяют прочность сварного соединения,

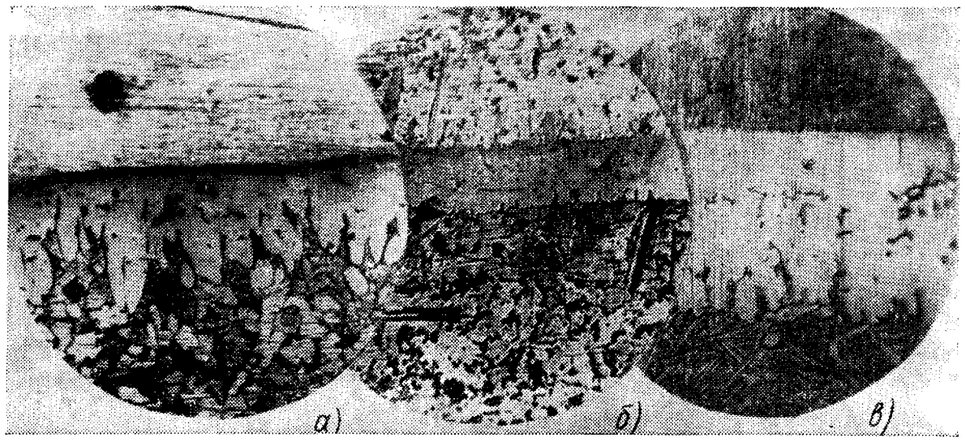


Рис. 11. Типовые прослойки интерметаллидов при сварке алюминия со сталью и никелем:

а — при алитировании стали и последующей сварке; *б* — при сварке по стали (слой алюминия нанесен при нагреве с помощью ТВЧ); *в* — при наплавке алюминия на никель

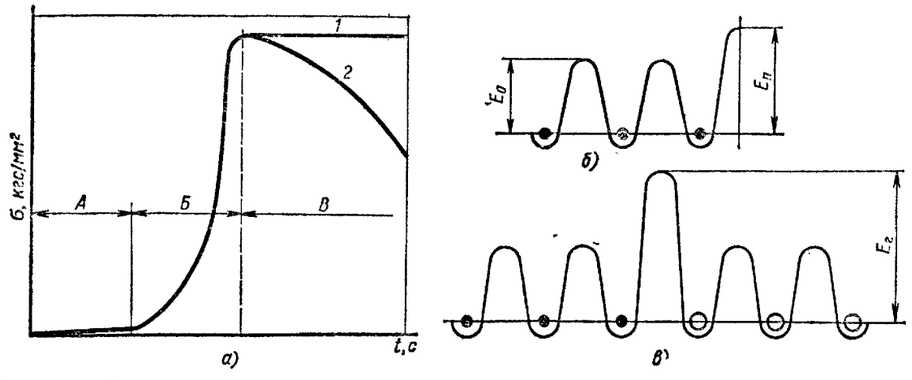


Рис. 12. Схемы изменения:

а — прочности сварного соединения в процессе физического (*А*) и химического (*Б*) взаимодействия контактирующих поверхностей (*1* — процесс растворения; *2* — процесс образования химического соединения); *б* и *в* — потенциальной энергии системы атомов у поверхности кристалла (*б*), на границе твердой и жидкой фаз в начальный период их контакта (*в*)

а также возможность появления химических соединений. Для протекания в контакте соединяемых металлов процессов электронного взаимодействия требуется определенная энергия. Эта энергия может быть тепловой (термическая активация), механической (механическая активация) или радиационной (радиационная активация). При сварке плавлением атомы сближаются в результате смачивания жидким (менее тугоплавким) металлом более тугоплавкого, твердого или частично

оплавленного металла, с активацией его поверхности и последующим образованием металлических связей, т. е. за счет тепловой энергии источника нагрева; при сварке давлением — за счет механической энергии давления статического (сварка давлением) либо ударно-импульсного (сварка взрывом).

При соединении разнородных металлов, из-за периода релаксации энергии, процессы диффузии затруднены и химическое взаимодействие происходит с опозданием (замедлением или ретардацией). Это замедление обусловлено тем, что на свободной поверхности твердого или жидкого металла атомы оказываются неуравновешенными из-за отсутствия связи (вакуум) или ослабления связи, обусловленной другими свойствами окружающей среды. Это приводит к повышению энергии $E_п$ поверхностного слоя (рис. 12, *б*) по сравнению с энергией E_0, необходимой атому для перемещения внутри тела. Аналогичное явление возникает и при сварке разнородных металлов, когда из-за быстрого образования физического контакта жидкого металла с твердым, более тугоплавким (стадия А), на границе фаз образуется пик межфазной энергии $E_г$ (рис. 12, *в*), так как переход атомной системы в новое состояние осуществляется не мгновенно, а за некоторый конечный промежуток времени; указанное явление и определяет период ретардации. Если длительность контактирования жидкого и твердого металлов в разнородном соединении меньше периода ретардации, то можно получить соединение разнородных металлов с ограниченной растворимостью без промежуточных хрупких прослоек.

Время ретардации (т. е. жизни атома перед потенциальным барьером), с [21]

$$\tau_р = \tau_0 \exp\left[\frac{e\,(E_т + E_ж)}{2kT}\right],$$

где τ_0 — время инкубационного периода для неактивируемого процесса ($E_т + E_ж = 0$), с; e — постоянная величина (заряд электрона); $E_т$ энергия активации диффузии в твердой фазе, В; $E_ж$ — энергия активации диффузии в жидкой фазе, В; k — постоянная Больцмана, эВ/(ат·К); T — температура, К.

Если длительность контактирования жидкого и твердого металлов в разнородном соединении меньше периода ретардации, то можно получить соединения разнородных металлов с ограниченной растворимостью без промежуточных хрупких прослоек. Расчеты показывают, что при сварке пары Ti и Al при взаимодействии жидкого алюминия с твердым нагретым титаном период ретардации (при котором в соединении отсутствуют хрупкие фазы) составит: 170 с при температуре алюминия 700° С; 9 с при 800° С; 1 с при 900° С.

Способы сварки разнородных металлов и сплавов указаны в табл. 8. Сварка без хрупких фаз затруднена тем, что в реальных сварных соединениях площади контакта велики, а контактирование происходит не по всей поверхности одновременно. Если исходить только из периода ретардации и стремления получить соединение без хрупких фаз, то можно получить соединение с «разрывным» контактом, т. е. такое соединение, когда связь устанавливается только в отдельных местах. Для соединения алюминия со сталью избежать образования хрупкой прослойки интерметаллидов при их непосредственной сварке вообще нельзя. Кроме того, прочность такого соединения может быть неудовлетворительной. Поэтому в некоторых случаях, особенно при крупногабаритных деталях, приходится выбирать такое время контактирования, когда заведомо образуется плотный и равномерный слой интерметаллидов, надежно связывающий соединяемые металлы, но с более низкой прочностью [1, 2].

Наиболее успешно удается сваривать отдельные пары металлов способами и приемами, при которых обеспечиваются: 1) минимальное время контактирования соединяемых металлов в жидком состоянии, что уменьшает размеры прослоек хрупких интерметаллидов либо даже предотвращает их возникновение; 2) надежная защита металла при сварке от взаимодействия с окружающим воздухом; 3) предотвращение образования хрупких интерметаллидов подбором промежуточных однородных или комбинированных из разных металлов вставок, хорошо сваривающихся с любым металлом свариваемой пары; 4) подавление роста интер-

металлических хрупких фаз легированием металла шва некоторыми компонентами.

При сварке плавлением тонкое регулирование нагрева более тугоплавкого металла свариваемой пары и степени нагрева легкоплавкого металла достигается при электронно-лучевой сварке и при нагреве независимым источником, т. е. плазменной сваркой, либо сваркой или наплавкой дугой косвенного действия [8, 18, 30].

Быстрый и равномерный контакт свариваемых жидкого легкоплавкого металла и нагретого тугоплавкого металла зависит от состояния поверхности тугоплавкого металла. Если поверхность тугоплавкого металла загрязнена, окислена и т. п., получить соединение нельзя. Предварительное покрытие этой поверхности поверхностно-активным слоем предохраняет ее от окисления при нагреве, уменьшает

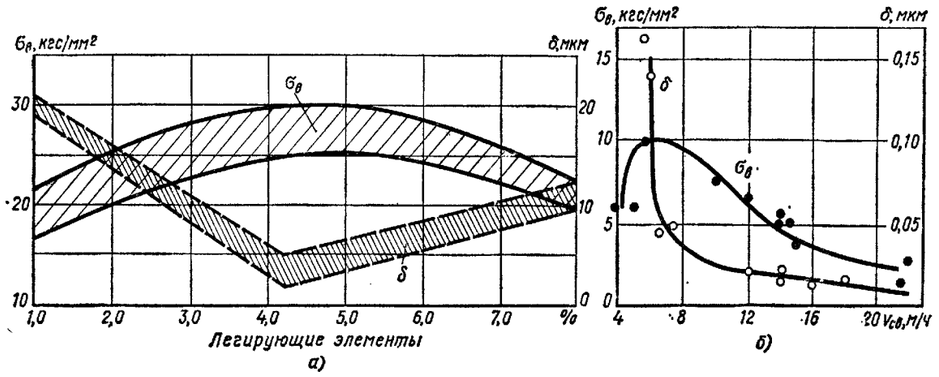


Рис. 13. Зависимость прочности сварного соединения стали и алюминия от:

а — толщины интерметаллической прослойки (по экспериментальным данным); *б* — толщины прослойки и скорости сварки

энергию активации, улучшает смачиваемость и стабилизирует контакт между жидким легкоплавким металлом и нагретой поверхностью. Могут быть применены покрытия [1, 19]: 1) цинковое, толщиной 30—50 мкм, наносимое гальваническим путем либо горячим цинкованием; 2) алюминиевое из чистого алюминия, толщиной 0,1—0,2 мм, наносимое алитированием; 3) комбинированное медно-цинковое; 4) комбинированное никель-цинковое; 5) расплавляемые прокладки при электронно-лучевой и диффузионной сварке [13].

На регулирование толщины соединительных прослоек, имеющих интерметаллиды, и регулирование прочности всего соединения влияет способ легирования металла шва некоторыми элементами. Например, при сварке аюминиевых сплавов АМц и АМг6 и оцинкованной стали толщина прослойки интерметаллидов значительно уменьшается при введении через присадочную проволоку до 5% Si, до 2,5% Cu и до 7% Zn.

Прочность сварного соединения зависит от толщины интерметаллической прослойки для соединения стали с алюминием (рис. 13, *а*) [1]. При сварке плавлением длительность нагрева и контактирования свариваемых металлов регулируют смещением источника тепла на один из металлов (более теплопроводный или легкоплавкий), а при контактной сварке — использованием электродов разного размера и сечения, применением теплоотводов и т. п. [19].

Для защиты металлов от действия окружающего воздуха наиболее универсальным оказался способ аргонодуговой сварки, но для тугоплавких и химически активных металлов (титана, ниобия, тантала, молибдена и др.) наилучшие условия обеспечиваются при электронно-лучевой и диффузионной сварке.

Сварка стали с цветными металлами и их сплавами

Сварка стали с алюминием и его сплавами. *Аргонодуговая сварка.* Подготовка стальной детали под сварку предусматривает для стыкового соединения двусторонний скос кромок под углом 70° к вертикали, так как при таком угле скоса прочность соединения достигает максимальной величины. Свариваемые кромки очищают механической обработкой, пескоструйным способом, химическим травлением, детали подают на операцию нанесения покрытия (поверхностно-активного слоя). Недопустимо применять дробеструйную очистку, так как на поверхности металла остаются окисные включения. Для углеродистых и низколегированных сталей лучшим покрытием является цинковое, наносимое на сталь гальваническим способом. Для аустенитных сталей (12Х18Н9Т и т. п.) лучшее покрытие алюминиевое; оно получается алитированием детали в месте сварки, после очистки с флюсом (50% KF + 50% KCl). Алитирование для углеродистых и низколегированных сталей применять не следует, так как в процессе алитирования растущие интерметаллиды оттесняют углерод и под прослойкой интерметаллидов образуется науглероженная зона, что снижает прочность сварного соединения [19]. Недопустимо наносить цинковое или алюминиевое покрытие по методу шоопирования, так как при этом частицы покрытия успевают окисляться, и удовлетворительно сварить алюминий со сталью не удается [1].

Сварку производят на переменном токе с использованием стандартных установок, вольфрамовых электродов диаметром 2—5 мм и аргона 1-го и 2-го сортов по ГОСТ 10157—73. Особенностью сварки алюминия со сталью, по сравнению с процессом аргонодуговой сварки алюминиевых сплавов, является расположение дуги, которое должно в начале сварки первого шва удерживаться на присадочном прутке, а в процессе сварки — на присадочном прутке и образующемся валике (рис. 14, *а*); этим предупреждается преждевременное выгорание покрытия [1]. Возможен и другой вариант, когда дуга ведется по кромке алюминиевой детали (рис. 14, *б*), а присадка — по кромке стальной детали таким образом, что жидкий алюминий натекает на поверхность стальной детали, покрытой цинком или алитированной [19]. При сварке, в зависимости от типа соединения, необходимо соблюдать последовательность наложения валиков шва, показанную на рис. 14, *в*. Наложение слоев в порядке, указанном на рис. 14, *в*, обеспечивает необходимое покрытие, а их чередование с лицевой и обратной стороны предотвращает перегрев стальной детали и преждевременное выгорание цинка с ее поверхности.

Сварочный ток зависит от толщины свариваемого металла.

Толщина металла, мм	3	6–8	9–10
Сила тока, А	110—130	130—160	180—200

В качестве присадочного материала применяют сварочную проволоку марки СвА97 (чистый алюминий с небольшой присадкой кремния), благоприятно влияющую на формирование диффузионной прослойки стабильного качества. Присадку из проволоки СвАМг6 применять не следует, так как она обеспечивает соединение меньшей прочности. В этом случае в формировании интерметаллического слоя принимает участие магний (до 1—2%). Атомы магния вместо атомов алюминия в кристаллической решетке одной из фаз обусловливают слабые связи, так как магний практически нерастворим в железе. При диффузионной сварке магний также препятствует сварке алюминия со сталью. Магний резко ускоряет рост прослойки из хрупких интерметаллидов в связи с тем, что он интенсифицирует развитие процессов реактивной диффузии.

Скорость сварки определяет время взаимодействия жидкого алюминия со сталью, т. е. толщину и стабильность соединительного диффузионного слоя (см. рис. 13, *б*). Для первых слоев скорость сварки назначают 7—10 м/ч, для последующих (когда сталь достаточно разогрета) 12—15 м/ч [1].

При сварке по гальванически оцинкованным кромкам стальной детали статическая прочность соединения при разрыве соответствует прочности алюминия (40 кгс/мм²). При нанесении на кромки слоя алюминия (путем алитирования или

с помощью ТВЧ) статическая прочность соединения повышается на 30—40% и достигает 13—18 кгс/мм² [1]. Повысить прочность соединения в целом можно увеличением рабочего сечения шва. Сварные соединения имеют высокий предел выносливости при действии знакопеременной изгибающей нагрузки (рис. 15). При базе 10^7 циклов предел выносливости 5—6 кгс/мм², т. е. такой же, как и для сплава АМг6. Разрушение образцов, как правило, происходит по сплаву АМг6, у внешнего концентратора.

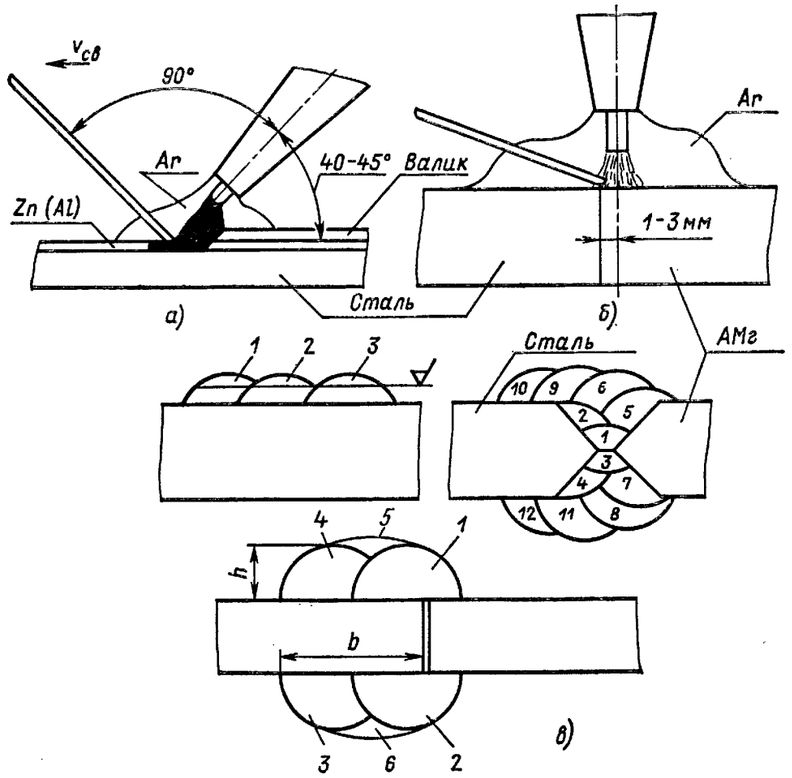


Рис. 14. Схемы аргонодуговой сварки и наплавки алюминия по стали:

а — ведения дуги при аргонодуговой наплавке; *б* — ведения дуги при стыковой сварке; *в* — последовательность наложения валиков шва в зависимости от типа соединения

Сварные соединения судовых конструкций показали высокую плотность при испытаниях на непроницаемость, а соединения труб — при испытаниях на герметичность [19]. Сварные соединения обладают высокой коррозионной стойкостью в морской воде и на воздухе при окраске их обычными для алюминиевых сплавов защитными покрытиями.

Гидравлические испытания сварных соединений труб из сплава САВ-1 и стали 12Х18Н9Т диаметром 60 и 145 мм после воздействия теплосмен (цикл: нагрев до 100° С, 30 мин, выдержка 30 мин; охлаждение до 20° С 40 мин, выдержка — 20 мин, нагрев до 100° С и т. д. 100 циклов) показали высокую прочность (при избыточном давлении $P_{разр} = 120 \div 190$ кгс/см²), а металлографическое исследование не выявило каких-либо изменений в сварном соединении [2].

Сварку стали с алюминием можно выполнять с применением комбинированных покрытий стали — медно-цинкового (4—6 мкм + 30—40 мкм) и никель-цинкового (5—6 мкм + 30—40 мкм). Соединительная прослойка интерметаллидов сложного состава получается несколько меньшей толщины и твердости, а предел прочности при растяжении (шов с усилением) при медно-цинковом покрытии достигает 18,7 кгс/мм², при никель-цинковом покрытии 20,3 кгс/мм² [19].

Холодная сварка давлением происходит при охватывании двух металлов в процессе их деформации при условии, что минимальная деформация обжатия не ниже 70—80%. Перед холодной сваркой свариваемые поверхности должны быть очищены не только от окислов, но и от пленок. Прочность соединения изменяется в пределах 8—10 кгс/мм² при сварке углеродистых сталей и алюминия и достигает 20—30 кгс/мм² при сварке сплавов АМг3 и АМг6 со сталью типа 12Х18Н9Т [13].

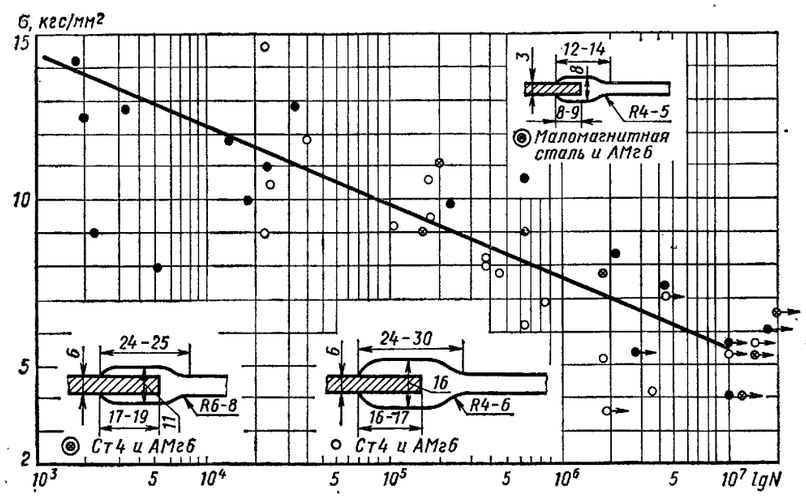


Рис. 15. Результаты усталостных испытаний сварных соединений из сплава АМг6 и стали

Сварку трением производят на режимах, при которых процесс расплавления алюминия и нагрев стыка значительно сокращены, что препятствует образованию прослойки хрупких интерметаллидов. Соединение стержней из сталей Ст3 и 12Х18Н9Т (образцы диаметром 16 и 20 мм) с алюминием АД1 осуществляется легко; предел прочности соединения при растяжении 9 кгс/мм², а угол загиба 180°. Соединение стали 12Х18Н9Т со сплавами АМц и АВ осуществимо; его предел прочности при растяжении 13 кгс/мм², а угол загиба 180°. При сварке стали 35 со сплавом Д19 (образцы диаметром 15—17 мм) было получено соединение с прочностью 32,6—32,9 кгс/мм² с разрушением сплава Д19. Повысить прочность соединений при сварке трением можно ограничением частоты вращения деталей ($n < 1000$ об/мин), в результате чего температура в стыке становится ниже температур образования жидких эвтектических прослоек, что не приводит к образованию интерметаллидов и хрупкости сварного соединения.

При контактной точечной сварке алюминия со сталью сталь (толщиной 1,5—2 мм) перед сваркой очищают и алитируют. Подготовленные таким образом стальные листы сваривают с алюминиевыми сплавами АМг, Д17 (толщиной 2 мм) контактной точечной сваркой на импульсных машинах типа МТПТ на режимах, обычных для алюминиевых сплавов. Прочность соединения на срез составляет 7—7,5 кгс/мм² [15].

Диффузионную сварку алюминиевых сплавов со сталью рекомендуется производить с применением промежуточных прослоек (из никеля, меди) для предотвращения образования хрупкой прослойки интерметаллидов. Контактные поверхности образцов перед сваркой обрабатывают резанием с получением параметров шероховатости поверхности $Ra = 3{,}2 \div 6{,}3$ мкм, а никелевые и медные прослойки наносят гальваническим способом. Сварку производят при разрежении в камере 10^{-3} мм рт. ст., нагреве металла до 500° С и давлении 0,75—1,4 кгс/мм²; время сварки 5—20 мин. Максимальная прочность соединения 9 кгс/мм² достигается при выдержке около 30 мин. При указанных условиях в месте соединения образуется переходная зона шириной 4—6 мкм с микротвердостью 50—140 кгс/мм² [13].

Сварку взрывом алюминия АДН со сталью 12Х18Н9Т производят при толщине стальных образцов 1,5—15 мм. Для этой пары свариваемых металлов прочность соединения на срез — 7,2 кгс/мм² [23].

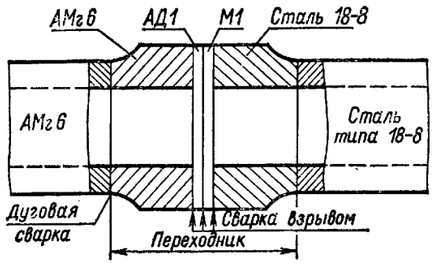


Рис. 16. Соединения труб из сплава АМг6 и стали типа 18-8 через переходник, изготовленный сваркой взрывом [16]

При действии ударной взрывной нагрузки по линии соединения образуется волнообразная поверхность и возникают металлические связи. Наиболее прочные соединения получаются, если между сталью и алюминиевыми сплавами вводят прослойку из чистого алюминия (например, АД1). Прочность соединения достигает прочности алюминиевого сплава при давлениях соударения 40—70 бар [22]. Использование таких комбинированных прослоек при определенном отношении суммарной толщины прослойки к толщине соединяемого металла (0,3—0,4) позволяет повысить прочность соединения при осевом растяжении до 27—30 кгс/мм² [16] и рекомендовать такие соединения в виде вставки для создания сосудов и труб (рис. 16), испытывающих высокие рабочие давления и действие динамических нагрузок.

Сварка стали с медью и ее сплавами. В равновесном состоянии при 20 °С медь растворяется в α-Fe в количестве до 0,3%, а железо в меди в количестве до 0,2%; хрупких интерметаллидов при этом не образуется. В связи с большими скоростями охлаждения при сварке в переходном слое образуется пересыщенный твердый раствор меди с железом, но даже при содержании железа до 2—2,5% структурно свободное железо не обнаруживается. Граница сплавления между сталью и медью резкая, с включением фазы, обогащенной железом. Со стороны стали, примыкающей к шву, размер зерна увеличивается в пределах зоны шириной 1,5—2,5 мм. Микротвердость зоны сплавления 580—620 кгс/мм² [6, 18].

Ухудшает взаимную растворимость железа и меди наличие в стали углерода, а улучшает — марганец и кремний. Марганец улучшает растворимость в связи с тем, что снижает критическую точку и расширяет область γ-твердого раствора, в котором медь растворяется в значительно большем количестве, а кремний раскисляет сварочную ванну и упрочняет зерна твердого раствора. Затруднения при сварке и наплавке меди на сталь связаны с высоким сродством меди к кислороду, низкой температурой плавления меди, значительным поглощением жидкой медью газов, различными коэффициентами теплопроводности, линейного расширения и т. д.

Одним из основных возможных дефектов при сварке следует считать образование в стали, под слоем меди, трещин, заполненных медью или ее сплавами. Это явление объясняют раскисляющим действием жидкой меди, проникающей в микронадрывы в стали по границам зерен при одновременном действии термических напряжений растяжения (эффект Ребиндера). Однако на углеродистых и низколегированных сталях трещин мало и размеры их невелики. В сталях, имеющих повышенное количество легирующих элементов, в частности в сталях типа 12Х18Н9, число и размеры трещин заметно возрастают, что снижает прочность соединений. Для сталей типа 12Х18Н8 эффективным средством уменьшения числа трещин является получение ферритной фазы в подслое либо использование аустенитно-ферритных сталей. Так, при соединении сталей с содержанием феррита свыше 30% проникновения меди в сталь не наблюдается, так как феррит не смачивается медью и проникновение меди в микронадрывы уменьшается [18]. Для уменьшения опасности образования в стали трещин рекомендуется вести сварку на минимальной погонной энергии; в качестве присадочного металла следует применять никелевый сплав МНЖ-5-1 или бронзу БрАМц9-2. Никель и алюминий в жидком металле снижают его поверхностную активность, что уменьшает опасность образования глубоких трещин в стали.

Медь, латунь и бронза успешно свариваются со сталью всеми способами сварки плавлением на таких же режимах, как и стальные сварные соединения соответствующих сечений. Однако дугу несколько смещают в сторону меди или ее сплавов. Для оптимизации условий наплавки меди на сталь требуется, чтобы не было расплавления стали, но она должна хорошо смачиваться (для этого ее температура не должна превышать 1100° С), и длительность контактирования меди со сталью при этой температуре должна быть не менее 0,01—0,015 с [30]. В этом случае резко уменьшается содержание железа в диффузионной прослойке (до 0,5%).

Для сварки и наплавки меди и ее сплавов со сталью применяют аргонодуговую сварку, сварку под плавлеными и керамическими флюсами, в ряде случаев электронно-лучевую и диффузионную. Для сварки меди, бронз БрАМц9—2, БрКМц3—1, латуни ЛК62-0,5 со сталями типа Ст3, Ст10, 09Г2 применяют: при ручной сварке электроды типа «Комсомолец», для сварки под флюсом ОСЦ-45 — проволоку марки БрКМц3—1. под флюсом АН-26 проволоку марки БрХ0,7, а при сварке в среде защитных газов проволоку марок БрКМц3—1, БрАМц9—2 и МНЖ5-1. Эффективным способом наплавки бронзы на сталь является наплавка под активными керамическими флюсами. В некоторых случаях необходим предварительный нагрев изделия. Режимы сварки назначают такими же, как и при сварке меди или ее сплавов. При различной комбинации электродных проволок (БрОФ6,5—0,15; БрАМц9—2, Бр.КМц3—1, БрАЖМц10—3—1,5) и флюсов АН-20, АН-26, АН-60, при наплавке получается металл с твердостью *НВ* 90—180 [6].

При указанных сварочных материалах и способах сварки обеспечивается равнопрочность сварного соединения (по цветному металлу) при действии статической нагрузки. Для сварного соединения медь МЗр — сталь предел прочности при растяжении 21—24 кгс/мм², для соединения сплав МНЖ5-1 — сталь предел прочности 28—36 кгс/мм². Сварные соединения обладают удовлетворительной пластичностью, так, для соединения меди М3 или сплава МНЖ5-1 со сталью Ст4 при ручной сварке угол загиба 40—85°, а при аргонодуговой сварке угол загиба 110—180°. Более высокое качество сварных соединений при аргонодуговой сварке сплавами МНЖ5-1 объясняется тем, что в металле шва содержание железа не превышает 8—10%, а при ручной сварке достигает 50—55%. Указанные способы обеспечивают также достаточно высокий предел усталости сварных соединений. Так, при базе испытаний $2 \cdot 10^6$ циклов предел выносливости соединений 2,5—3 кгс/мм²; при наплавке бронзы БрАМц9—2 на сталь Ст3 предел выносливости стального образца не снижается.

Другие способы сварки меди и ее сплавов со сталью не имеют такого значения, как указанные выше. Успешно выполняют диффузионную сварку меди М1 с армко-железом и бронзы БрХ0,7 со сталью (типа 18-8). Для сварки других бронз со сталью разработана технология диффузионной сварки через промежуточные никелевые и оловянные покрытия [13]. Медь и ее сплавы со сталью хорошо свариваются методом сварки взрывом. Так, для соединения меди М3 со сталью 12Х18Н9Т прочность соединения 16,8 кгс/мм² при отсутствии резкого повышения микротвердости в зоне соединения [23]. Благодаря хорошей свариваемости меди

со сталью при этом способе, медь используют в качестве промежуточной прослойки при создании сталеалюминиевых переходников [10]. Известно применение электронно-лучевой сварки меди со сталью типа 18-8.

Сварка стали с титаном. Одной из основных задач при сварке титана со сталями является выбор таких присадочных материалов, способов и режимов сварки, при которых предотвращается или резко подавляется образование хрупких интерметаллических фаз TiFe и $TiFe_2$. Непосредственная сварка титана со сталью не дает положительных результатов. Практическое применение находит сварка через промежуточные вставки. Единственный металл, хорошо соединяющийся с титаном и сталью без образования интерметаллических фаз, — ванадий, однако и он может образовывать карбиды.

Хорошие результаты получаются при использовании комбинированной вставки, состоящей из технического тантала и термически обрабатываемой бронзы БрБ2. При аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом бронза сваривается с углеродистой или аустенитной сталью, а тантал с титаном (для титана и тантала необходима дополнительная защита или сварка в камерах с контролируемой средой).

При использовании комбинированной вставки, изготовленной из бронзы БрБ2 и ниобия, для титана ОТ4-1 и стали ХН65ВМТЮ толщиной 0,7 и 2 мм аргонодуговую сварку производят в камере с контролируемой атмосферой [5].

При диффузионной сварке титана со сталью соединение получается хрупким в связи с выделением интерметаллидов по линии соединения. Применение комбинированной прослойки из ниобия и бронзы БрБ2 дает удовлетворительное соединение. Наилучшие результаты при диффузионной сварке сплава титана ВТ5-1 и стали 12Х18Н10Т получаются также при использовании трехслойной вставки, состоящей из ванадия, меди и никеля. Промежуточный слой получают прокаткой в вакууме при 800—900° С с обжатием до 55—60%. Слой никеля на границе со сталью улучшает пластичность соединения. С помощью такой технологии изготовляют трубчатые переходники, которые выдержали вакуум, гидравлические, вибрационные и коррозионные испытания [13].

Применение вставки из ванадия ВВ8 позволило сварить трубные заготовки из титана ОТ4-1 ($\delta = 1{,}5$ мм) и стали ВНС2 ($\delta = 1{,}2$ мм) электронно-лучевым методом [31]. При сварке ванадия со сталью луч был смещен от стыка в сторону стали на 1,1—1,3 мм; при сварке ванадия с титаном луч смещали в сторону титана на 0,5 мм. Сварное соединение имело прочность 49—52 кгс/мм² и разрушалось по основному металлу.

Сварка стали с ниобием и молибденом. Для получения соединения сплава ниобия ВН2 со сталью 12Х18Н9Т и молибденового сплава ЦМ-2А со сталью 12Х18Н9Т рекомендуется сварку вести по отбортовке встык или внахлестку так, чтобы расплавлялась только сталь, без расплавления тугоплавкого металла. При электронно-лучевой сварке основной процесс взаимодействия расплавленной стали с ниобием — смачивание жидкой сталью твердого ниобия, растворение его и диффузия ниобия в сталь, которая определяется температурой расплава и временем контакта. Без прослойки интерметаллидов прочность соединения 55 кгс/мм²; при толщине прослойки 3 мкм она снижается до 37 кгс/мм² [25].

Соединение ниобиевых сплавов ВН4 и ВН2АЭ со сталью 12Х18Н9Т (образцы диаметром 10—16 мм, высотой 30—50 мм) получают магнитно-импульсной сваркой в вакууме через прослойку никеля (толщиной 0,1—0,2 мм). Режим сварки: нагрев в вакууме до 900—1150° С; удельная энергия удара 0,2—0,3 кгс/мм²; скорость движения ударника 6 м/с. Деформация никеля при сварке до 70%, общая деформация образца по высоте 10%. Высокая прочность соединения объясняется отсутствием в соединении интерметаллидов и эффектом контактного упрочнения прослойки [8].

Сварка стали с ванадием. Основной рекомендуемый способ сварки — электронно-лучевой [4]. Для получения патрубков из ванадиевого сплава ВН3 и стали 12Х18Н10Т рекомендована следующая технология. Расфокусированным лучом нагревают ванадиевый сплав до 1000 °С, затем луч смещают в сторону стали и

нагревают ее до расплавления. Шов образуется в результате взаимодействия жидкой стали с нагретым ванадием. Полученное таким способом соединение равнопрочно основному металлу, разрушение происходит по ванадиевому сплаву вдали от места соединения.

Сплав ванадия ВНМ-1 можно сваривать со сталью 12Х18Н9Т в условиях вакуума [(2—5) 10^{-5} мм рт. столба] с нагревом места сварки (в герметичном контейнере) до 900—1200° С с последующим обжатием в прессе в течение 1—2 с и деформацией заготовок на 45—70% [4]. Сварка проверена по двум вариантам: при непосредственном контакте стали и ванадия и при контакте через листовую бронзу БрХ0,7. Прочность соединения оказалась в пределах 24—26 кгс/мм², но по стыку обнаружена значительная диффузионная зона, вызванная значительной пластической деформацией.

Стыковые и кольцевые соединения ванадия ВН3 и ВНМ-1 со сталями 12Х18Н12Т и 09Х16Н4Б толщиной 1—3,6 и 10 мм получаются электронно-лучевой сваркой. Во избежание образования хрупкой σ-фазы между сталью и ванадием закладывали полоски из низкоуглеродистых сталей 03Х35Н8 или 03Х17Н4 толщиной 0,5—1 мм, которые переплавлялись как присадочный металл одновременно с основным электронным лучом. При $v_{св} = 20 \div 65$ м/ч и содержании углерода не более 0,03% основная структурная составляющая шва — пластичный феррит, легированный ванадием с небольшим количеством карбидов ванадия с высокой прочностью и пластичностью соединения. Электронно-лучевой сваркой получают сварные соединения ванадия со сталями типа 18-8, обладающие высокой стойкостью против хрупких разрушений. Возможность диффузионной сварки ванадия со сталью была рассмотрена выше в варианте сварки титана со сталью через композитный трехслойный прокат, состоящий из ванадия, меди и никеля [13].

Сварка разнородных цветных металлов и сплавов

Сварка алюминия и его сплавов с медью. Кроме значительного различия физико-химических свойств алюминия и меди, сварка металлов затруднена образованием хрупкой интерметаллидной фазы. Для облегчения процесса сварки на медь (после ее очистки) необходимо наносить слой покрытия, который улучшает смачиваемость меди алюминием. Лучшим является цинковое покрытие толщиной 50—60 мкм, которое наносят гальваническим методом.

Аргонодуговая сварка. Алюминий с медью сваривают по такой же схеме, как и алюминий со сталью, т. е. дугу смещают на более теплопроводный металл (в данном случае на медь) на 0,5 толщины свариваемого металла. На границе соединения со стороны меди образуется прослойка интерметаллидов ($CuAl_2$) толщиной 3—10 мкм, а со стороны алюминия — полоска твердого раствора меди в алюминии такого же размера. Микротвердость прослойки интерметаллидов, примыкающих к меди, достигает 450—550 кгс/мм². Наличие этой зоны обусловливает относительно низкую прочность соединения; только в том случае, если толщина интерметаллидной прослойки меньше 1 мкм, она не влияет на прочность соединения.

Прочность соединения, так же как и в соединениях стали с алюминием, повышается при легировании металла шва кремнием (4—5%) и цинком (6—8%), что объясняется тем, что эти элементы подавляют рост интерметаллидной прослойки. Для обеспечения стабильной прочности сварных соединений по свариваемой кромке меди нужно делать скос под углом 45—60° (рис. 17, *а*).

Сварка по флюсу. Алюминий А5 с медью М1 автоматически сваривают по флюсу АН-А1 при толщине металла 8, 10, 12 и 20 мм, проволокой марки СВА97 диаметром 2,5 мм — по слою стандартного флюса толщиной 12—14 мм [3]. При сварке по флюсу электрод необходимо смещать от скоса на 5—7 мм в сторону меди. Сварку ведут с дополнительной подачей присадочной проволоки. В табл. 9 приведены рекомендуемые режимы автоматической сварки по флюсу и аргонодуговой сварки.

При обоих способах сварки предел прочности при растяжении равен пределу прочности алюминия (7—10 кгс/мм²), удельное электросопротивление шва не-

сколько выше (0,037 Ом·мм²/м), чем у алюминия (0,0313 Ом·мм²/м). Прочность сварных соединений при длительном нагреве до 150° С не изменится. При более высоком нагреве прочность соединения снижается в связи с резким увеличением слоя хрупких интерметаллидов.

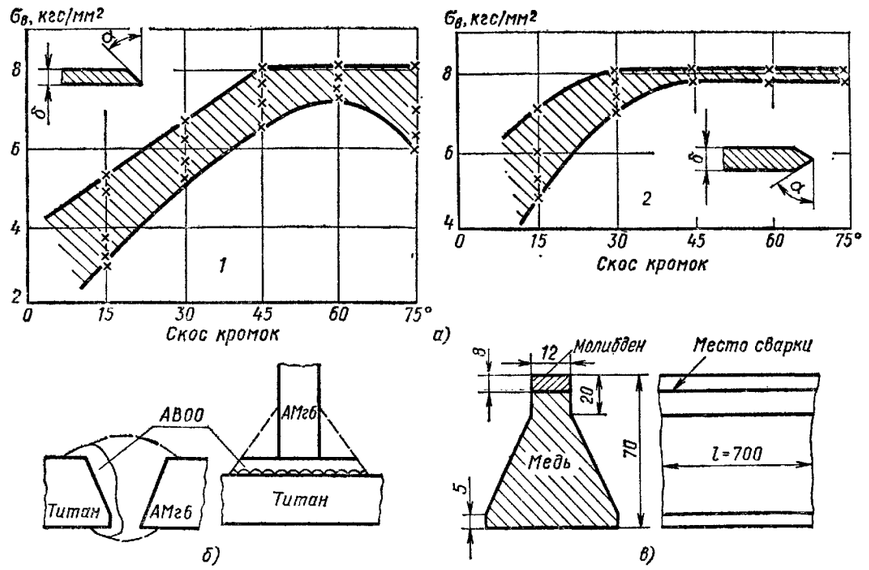


Рис. 17. Схемы сварки меди с алюминием, титаном и молибденом:

а — прочность соединения меди с алюминием в зависимости от угла разделки медной кромки: *1* — V-образная; *2* — Х-образная; *б* — подготовка кромок титана для сварки его с алюминиевым сплавом; *в* — форма сварного электрода из меди и молибдена

Испытания сварных соединений толщиной 6 мм из меди М1 и алюминия А5, выполненных аргонодуговой сваркой, при действии симметричного знакопеременного изгиба показали, что предел выносливости их одинаков с пределом выносливости сварных соединений из алюминия во всем диапазоне испытаний ($N = 10^3 \div 10^6$ циклов).

9. Режимы сварки алюминия с медью

Способ сварки	Толщина металла, мм	Сварочный ток, А	Напряжение на дуге, В	Скорость сварки, м/ч	Смещение электрода от стыка на медь, мм	Диаметр электрода, мм	Диаметр присадочной проволоки, мм	Расход аргона, л/мин	Число слоев
Аргонодуговая неплавящимся электродом	3	160—180	14—15	10—12	1,5—2	4	2	7—8	2
	6	270—290	15—16	7—8	3—4	5	2,5	8—10	2
	8	320—330	16—18	6—7	4—5	6	3	10—12	2
Автоматическая по флюсу АН-А1	10	380—400	38—40	21,5	5—6	2,5	—	—	1
	12	390—410	39—42	21,5	6—7	2,5	—	—	1

Холодную сварку давлением алюминия с медью осуществляют при давлениях 150—200 кгс/мм² при сварке встык, 8—10 кгс/мм² при армировании алюминиевых шин медными накладками. Диффузионные процессы по плоскости контакта при этом способе не наблюдаются [19].

Сварку трением стержней диаметром 20 мм из алюминия АД1 и меди М1 производят в нагретом состоянии при давлении 3 и 20 кгс/мм² (ковочное). Микротвердость сварного соединения в прослойке 116 кгс/мм² (нагрузка 100 кг), угол загиба соединения 180°.

Контактную стыковую сварку сопротивлением и оплавлением широко применяют для соединения алюминия с медью. Для уменьшения возможности образования хрупких интерметаллидов в этом случае рекомендуют медь цинковать или алитировать, а иногда и покрывать слоем серебряного припоя. Наиболее благоприятные результаты получены при контактной сварке по методу оплавления, так как при этом обеспечивается более полное разрушение и удаление хрупких фаз из металла и шва. Прочность соединения при контактной сварке оплавлением 6—7 кгс/мм², угол загиба 180°.

Диффузионную сварку в вакууме [13] алюминиевых сплавов АН и АМг с медью осуществляют на режиме: температура 480—510° С; давление 0,5—1 кгс/мм² при разрежении 10^{-4} мм рт. ст.; время 15 мин; прочность соединения на разрыв 10—12 кгс/мм².

Сварка алюминия и его сплавов с титаном [28]. При аргонодуговой сварке титанового сплава ОТ4 с алюминиевыми сплавами АМг6 рекомендуется очистка кромок титана от α-слоя и загрязнений и алитирование чистым алюминием при 800—830 °С с выдержкой 1—3 мин. В этом случае период образования соединения между алюминием и титаном меньше, чем период ретардации (см. рис. 12, *а*), и хрупкие интерметаллиды по линии соединения не успевают образоваться. Кромки предварительно разделывают согласно рис. 17, *б*. До сварки на алитированные кромки наплавляют слой чистого алюминия (5—8 мм). Последующую сварку соединений производят обычным методом как сварку алюминиевого сплава. Предел прочности при растяжении сварного соединения сплавов ОТ4 и АМг6 зависит от слоя алюминия и составляет 11—27 кгс/мм², угол загиба 17—30 °.

Стержни диаметром 20 мм из титанового сплава ВТ5 с алюминиевыми сплавами АД1, АМц и АМг сваривают трением. Предел прочности при растяжении для соединений равен соответственно 9, 13 и 20 кгс/мм². Угол загиба во всех случаях равен 180°.

Сварка меди и ее сплавов с титаном [24]. Сварка титана с медью затруднена из-за различия свойств и образования хрупких интерметаллидов (см. табл. 2). Наиболее успешно сварку плавлением осуществляют при использовании промежуточных вставок из специально выплавленных сплавов титана, легированного молибденом, ниобием или танталом, которые снижают температуру превращения $\alpha \rightleftarrows \beta$ и обеспечивают получение однородного титанового сплава со стабильной β-структурой, не сильно отличающейся от структуры меди. Возможно использование вставок из сплавов Ti — 30% Nb и ВТ5 (3% Al; 6,5—7,5% Mo; 9—11% Cr). Эти сплавы при сварке с медью М3 обеспечивают предел прочности соединения при растяжении 22—22,5 кгс/мм² и угол загиба 140—180°, а при сварке с бронзой БрХ0,8 $\sigma_в = 26 \div 28$ кгс/мм² и $\varphi = 100 \div 160°$. В прослойке по линии соединения микротвердость достигает 470—480 кгс/мм² при микротвердости бронзы БрХ0,8 120 кгс/мм².

При *диффузионной сварке* меди с титаном необходимо применять промежуточные прослойки. Диффузионную сварку стержней диаметром 15 мм из титановых сплавов ОТ4 и ВТ14 с медью М1 и бронзой БрХ0,7 [5] производят с применением прослоек из молибдена или ниобия толщиной 0,1—0,2 мм. Прослойку напыляют на титан, а образец предварительно отжигают в камере при 140° С в течение 3 ч, при разрежении 10^{-3}—10^{-4} мм рт. ст. Прочность соединения 19—27 кгс/мм². Хорошие результаты получаются, если свариваемые поверхности полированы.

Сварка меди с ниобием, молибденом, танталом. При сварке специального электрода (для МГД установки) из меди и молибдена, имеющего значительные

размеры (см. рис. 17,*в*). Детали после подготовки собирали в специальном зажимном приспособлении из стали типа 18-8 и в таком виде помещали в индукционную печь [17]. Сварку производили при нагреве до 950° С и давлении по стыку 2,63 кгс/мм² (за счет различных коэффициентов линейного расширения); выдержка в печи 2 ч. При достаточной прочности стык имел высокую герметичность. Ниобий удовлетворительно сваривают с медью и медными сплавами, с которыми он образует ограниченные растворы. Тантал с медью растворов и соединений не образует [19]. Однако при сварке в качестве вставок применяют бериллиевую бронзу БрБ2, так как путем ее закалки (перед сваркой) прочность соединения удается повысить до 60 кгс/мм² [5]. Одним из вариантов электронно-лучевой сварки меди М1 толщиной 1,5 мм с молибденом ВМ2 и танталом толщиной 0,5 мм встык является случай, когда на молибденовые стержни диаметром 14 мм надевают медные втулки с толщиной стенки 1,5 мм и сварку производят по кромке медной втулки внахлестку. В обоих случаях соединения вакуумно-плотные. При электронно-лучевой сварке бронзы БрХ0,7 с ниобиевым сплавом ВН2 [29] для мелких деталей луч равномерно распределен на обе детали. При большей массе деталей луч должен быть смещен на $^2/_3$ на ниобиевый сплав и на $^1/_3$ на бронзу.

Сварка ниобия с молибденом. Плоские (100 × 30 × 1 мм) и цилиндрические (диаметром 4—6 мм) образцы подвергают электронно-лучевой сварке на установке У-250 А [30]. Образцы металла высокой чистоты имели следующие примеси: молибден: 0,002% С, 0,002% O_2, 0,003% N_2, 0,0004% H_2; ниобий: 0,008% С, 0,005% O_2, 0,008% N_2, 0,001% H_2. Сварные соединения обладают высокой пластичностью в том случае, если в шве будет не более 20% Nb или 36% Mo для более чистых металлов (ЦМ6 и НВ4) и не более 12% Mb или 19% Mo для менее чистых металлов (ВМ1Д и ВН2А). При критическом составе, приводящем к большому количеству трещин, в шве содержится 40—50% Nb [30]. Ниобий влияет на охрупчивание молибдена, так как молибден более чувствителен к примесям внедрения, а ниобий вносит в шов повышенное количество таких примесей. При электронно-лучевой сварке листов ($\delta = 1$ мм) молибдена марок ВМ1Д и ЦМ6 со сплавом ниобия ВН-2А и чистым ниобием НВ4 изучали структуру шва [7]. В швах, имеющих свыше 30% Mo, пластичность снижена, что объясняется наличием зоны стесненной кристаллизации, приводящей к образованию дефектов. При электронно-лучевой сварке молибдена с ниобием особое значение имеет состояние свариваемой поверхности. Тщательная очистка на воздухе недостаточна, так как при нагреве молибдена за счет адсорбированных на поверхности газов образуются окислы, которые ухудшают состояние поверхности. Зачищенные детали рекомендуется перед сваркой подвергать предварительной дегазации в вакууме путем нагрева до 800—1000° С с выдержкой в течение 5 мин. При электронно-лучевой сварке ниобиевой проволоки диаметром 1 мм с молибденовыми стержнями диаметром 12 мм в стержнях сверлили отверстия диаметром 1 мм и глубиной 6 мм, в которые ниобиевые проволоки вставляли плотно без зазора. Сварку осуществляли оплавлением поверхности молибдена на глубину 2—2,5 мм. При испытании на вырывание разрушалась ниобиевая проволока. Микротвердость на границе сплавления в 2 раза выше микротвердости ниобия, и в 1,5 раза выше микротвердости молибдена. Возможности диффузионной сварки меди с ниобием, молибденом и танталом и ниобия с молибденом подробно рассмотрены в работе [13]. Исследовательские работы последних лет показывают возможность лазерной сварки большого числа пар разнородных металлов, однако отмечается большой разброс в свойствах сварных соединений и в некоторых случаях неудовлетворительная их пластичность. Этот вид сварки является перспективным для изделий микроэлектроники.

Применение биметалла для получения сварных соединений разнородных металлов [20]

Биметаллические вставки из углеродистой и коррозионно-стойкой стали с алюминиевыми сплавами, из стали и медно-никелевого сплава МНЖ5-1, из стали 12Х18Н9Т и титанового сплава ОТ4, ОТ4-1 применяют для сварки разнородных

металлов. При применении проката из биметалла из стали Ст3 и 10ХСНД и алюминиевых сплавов АМг3 и АМг6 соотношение толщин сплава и стали в пакете 1 : 1 и 1,5 : 1. Алюминиевый сплав соединяется со сталью при прокатке по подслою из чистого алюминия. Прочность биметалла на срез 7—9 кгс/мм² и на отрыв 10—15 кгс/мм². Прочность сварного соединения зависит от прочности сцепления слоев биметалла и, следовательно, от площади биметаллической вставки (рис. 18). Недостатком рассматриваемых соединений является неконструктивность узлов соединения и отсутствие средств контроля качества сцепления слоев биметалла. Это часто приводит к тому, что соединение этого типа не обладает герметичностью.

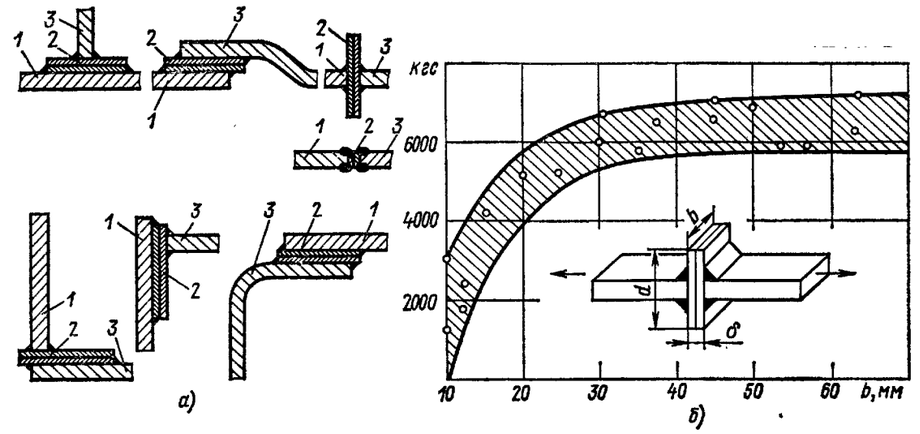


Рис. 18. Схемы сварных соединений при использовании проката из биметаллических вставок:

а — соединение стали с алюминиевым сплавом с помощью биметаллических вставок: *1* — сталь; *2* — биметалл; *3* — алюминиевый сплав [20]; *б* — зависимость прочности сварного соединения от площади биметаллической вставки (Ст3 и АМг6; $d = 70$ мм; $\delta = 10 \div 12$ мм)

Для предотвращения появления хрупких интерметаллидов внутри биметалла при нагреве в процессе сварки необходимо выдержать рекомендуемый режим сварки. Для биметалла толщиной 10—12 мм рекомендуются: а) со стороны алюминиевого сплава аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом на режиме: $I = 140 \div 160$ А; $U_д = 14 \div 18$ В; $v_{св} = 6 \div 7$ м/ч; б) со стороны стали сварка в CO_2 на режиме: $I = 100 \div 130$ А; $U_д = 18 \div 20$ В; $v_{св} = 17 \div 20$ м/ч.

Наиболее вероятно образование хрупких интерметаллидов в биметалле Ст3, 12Х18Н9Т и сплаве АМг6 при нагреве по линии соединения выше 450° С. При нагреве до 550° С и выше биметалл расслаивается, поэтому рекомендуется сварку начинать со стороны алюминия, а после охлаждения всего узла — со стороны стали.

Список литературы

1. **Бельчук Г. А.** Исследование некоторых особенностей технологии аргонодуговой сварки алюминия и его сплавов со сталью. — «Сварочное производство», 1961, № 5, с. 20—22.

2. **Бельчук Г. А., Кох Б. А.** Прочность сварных сталеалюминиевых соединений в условиях действия теплосмен. — «Автоматическая сварка», 1972, № 9, с. 43—46.

3. **Воропай Н. М.** Особенности технологии автоматической сварки по флюсу алюминия с медью. — «Автоматическая сварка». 1967, № 2, с. 39—42.

4. **Гонсеровский Ф. Г.** Сварка стали Х18Н9Т с ванадием. — «Автоматическая сварка», 1972, № 4, с. 63—65.

5. **Горин И. Г.** О сварке титановых сплавов на никелевой основе. — «Сварочное производство», 1964, № 12, с. 25—28.
6. **Джеваго И. И., Лебедев Ю. М., Иващенко Т. М.** Исследование зоны сплавления сварных соединений углеродистой стали с алюминиевой бронзой. — «Автоматическая сварка», 1970, № 8, с. 11—14.
7. **Задерий Б. А., Шевчук Т. В.** Особенности структуры металла шва соединений ниобия с молибденом. — «Автоматическая сварка», 1975, № 6, с. 27—29.
8. **Закономерности** образования и роста интерметаллического слоя в сварных соединениях ниобия с железом. — «Автоматическая сварка», 1975, № 1, с. 70—71. Авт.: Г. К. Харченко, А. И. Игнатенко, С. В. Шеведи и др.
9. **Закс И. А.** Сварка разнородных сталей. М., «Машиностроение», 1973. 208 с.
10. **Земзин В. Н.** Сварные соединения разнородных сталей. М. — Л., «Машиностроение», 1966. 230 с.
11. **Земзин В. Н., Баграмова Т. И., Титинер З. К.** Исследование высоконикелевых электродов для заварки дефектов в литых корпусных деталях паровых турбин. ЛДНТП, 1974. 22 с.
12. **Игнатов В. А., Земзин В. Н., Петров Г. Л.** Влияние никеля в аустенитных швах на миграцию углерода в сварных соединениях разнородных сталей. — «Автоматическая сварка», 1967, № 8, с. 1—5.
13. **Казаков И. Ф.** Диффузионная сварка металлов. М., «Машиностроение», 1976. 200 с.
14. **Кудрявцев И. В., Наумченко Н. Е.** Усталость сварных конструкций. М., «Машиностроение», 1976. 270 с.
15. **Лобанов Ю. Н.** Точечная сварка алюминия с алитированной сталью. — «Сварочное производство», 1967, № 2, с. 32—33.
16. **О рациональном** проектировании сварных сосудов и труб из разнородных металлов. — «Сварочное производство», 1973, № 9, с. 3—5. Авт.: А. С. Богомолов, О. А. Бакши, В. С. Седых и др.
17. **Петранговский А. Н.** Сварка меди с молибденом. — «Автоматическая сварка», 1972, № 12, с. 69—70.
18. **Плазменная** наплавка металлов. М., «Машиностроение», 1969. 190 с. Авт.: А. Е. Вайнерман, М. Х. Шоршоров, В. Д. Веселков и др.
19. **Рабкин Д. М., Рябов В. Р.** Сварка алюминия и его сплавов со сталью и медью. М., «Машиностроение», 1965. 94 с.
20. **Раздуй Ф. И., Засуха П. Ф., Рябов В. Р.** Сварка сталеалюминиевых конструкций с помощью биметаллических вставок. — «Сварочное производство», 1966, № 1, с. 9—11.
21. **Рыкалин Н. Н., Шоршоров М. Х., Красулин Ю. Л.** Физические и химические проблемы соединения разнородных материалов. М., АН СССР, Неорганические материалы, т. 1, 1965, № 1.
22. **Сахновская Е. Б., Седых В. С., Трыков Ю. П.** Свойства соединений аустенитной стали с алюминиевыми сплавами при сварке взрывом. — «Сварочное производство», 1971, № 7, с. 34—35.
23. **Сварка** взрывом. — «Сварочное производство», 1962, № 5, с. 3—6. Авт.: В. С. Седых, А. А. Дерибас, Е. И. Биченков и др.
24. **Сварка** титановых сплавов с медью и ее сплавами. — «Сварочное производство», 1965, № 8, с. 1—3. Авт.: А. С. Михайлов, Е. В. Слонимский, Ю. М. Сенин и др.
25. **Сивов Е. Н., Дьяченко В. В.** Влияние термического цикла электроино-лучевой сварки на формирование шва сварных соединений ниобия со сталью. — «Сварочное производство», 1973, № 4, с. 11—13.
26. **Справочник** по сварке. Т. 4. Под ред. А. И. Акулова. М., «Машиностроение», 1971, с. 194—211.
27. **Технология** электрической сварки металлов и сплавов плавлением. Под ред. Б. Е. Патона. М., «Машиностроение», 1974. 768 с.
28. **Фридлянд Д. А., Зиновьева Т. Н., Конев Ю. Х.** Сварка алюминия с титаном. — «Сварочное производство», 1963, № 11, с. 5—8.
29. **Щетанов Д. П.** Сварка ниобиевого сплава ВН2 с бронзой БрХ0,8. — «Сварочное производство», 1970, № 8, с. 42.
30. **Электронно-лучевая** сварка ниобия с молибденом. — «Автоматическая сварка», 1973, № 8, с. 65—68. Авт.: С. М. Гуревич, Б. А. Задерий, Г. К. Харченко, Ю. П. Гаранин и др.
31. **Электронно-лучевая** сварка титанового сплава ОТ4-1 со сталью ВНС-2. — «Сварочное производство», 1974, № 10, с. 19—20. Авт.: В. Р. Петренко, Ф. А. Рыжов, А. В. Баштаков и др.

Глава 15
СВАРКА ЧУГУНА

КЛАССИФИКАЦИЯ И СВОЙСТВА ЧУГУНА

В качестве конструкционного материала в промышленности широкое применение находит чугун, что обусловлено простотой и невысокой стоимостью изготовления изделий из чугуна, хорошими литейными свойствами, износостойкостью, надежной работой в условиях знакопеременных нагрузок и повышенных температур и т. д.

Чугун является многокомпонентным железоуглеродистым сплавом, содержащим свыше 2% С, до 5% Si и некоторое количество марганца. Сера и фосфор, как правило, являются примесями. В легированные чугуны, кроме того, вводят хром, никель, молибден и другие элементы, придающие ему особые свойства. Наличие эвтектики в структуре чугуна обусловливает его применение исключительно в качестве литейного сплава.

В зависимости от состава, условий кристаллизации и скорости охлаждения углерод в чугуне может находиться в химически связанном состоянии в виде цементита или в структурно-свободном состоянии в виде графита. Наличие цементита в сплаве придает излому светлый цвет. Поэтому чугун, в котором углерод находится в виде цементита, называется белым. Графит придает излому серый цвет, и такие чугуны называются серыми.

Графитизаторами в чугунах являются углерод, кремний, алюминий, медь, никель и др. Эти элементы с железом образуют твердые растворы, увеличивающие в его решетке число вакансий и смещений, облегчающих диффузию, уменьшающих энергию активации и ослабляющих связи между атомами углерода и железа и тем самым способствующих графитизации. Степень их влияния различна. Наиболее сильными графитизаторами являются углерод и кремний. Кремний, содержание которого в серых чугунах составляет 1,2—3,5%, влияет на строение чугуна и в первую очередь на степень его графитизации. Кремний изменяет степень эвтектичности сплава, под которой понимают отношение общего содержания углерода в чугуне к содержанию его в эвтектике. Используя графитизирующее действие кремния, можно получить эвтектический чугун при введении в него меньшего количества углерода. Регулируя соотношение углерода и кремния в сплаве, можно получить требуемую структуру в чугунной отливке (рис. 1, *а*).

Процесс графитизации зависит от скорости охлаждения отливки. Чем меньше скорость охлаждения, тем полнее осуществляется процесс графитизации. В условиях производства чем меньше отливка, тем больше скорость охлаждения. В результате для обеспечения процессов графитизации с уменьшением толщины стенки отливки необходимо увеличить суммарное содержание в ней углерода кремния (рис. 1, *б*).

По структуре чугуны разделяют на следующие группы:

1) белые чугуны, в которых весь углерод находится в виде цементита; 2) серые чугуны, в которых углерод содержится главным образом в виде пластинчатого графита; 3) высокопрочный с шаровидным графитом; 4) ковкий чугун (графит хлопьевидной формы).

Белые чугуны имеют ограниченную область применения, так как цементит, присутствующий в его структуре в виде вторичного цементита и в составе ледебурита, придает ему высокую хрупкость, твердость, и они практически не поддаются обработке резанием. Некоторое применение в промышленности находят отбеленные чугуны, в частности при отливке деталей дробильных и размалывающих

установок и для других деталей, от которых требуется большая поверхностная твердость и износостойкость. В отбеленных чугунах из-за различных условий кристаллизации в поверхностном слое образуется цементитная эвтектика (*НВ* 400—500), а в середине отливки — графитная. Такие условия охлаждения получаются при отливке чугуна в металлический кокиль или сырую песчаную форму. Для этих целей применяют чугун с пониженным содержанием кремния.

Серые чугуны (ГОСТ 1412—70) по химическому составу представляют собой сплав Fe—C—Si, содержащий примеси Mn, P и S. Наибольшее применение в промышленности получили доэвтектические чугуны, содержащие 2,4—3,8% C. Дальнейшее повышение углерода вызывает ухудшение механических свойств чугуна. Лучшие литейные свойства обеспечиваются при содержании углерода не менее

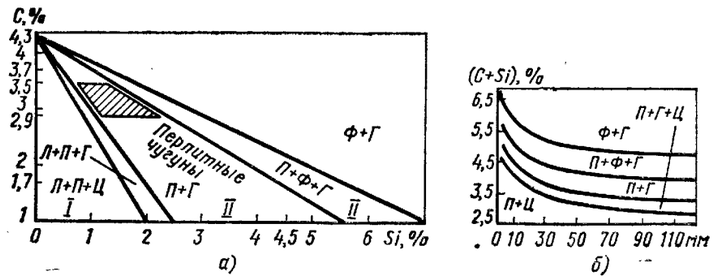


Рис. 1. Структурные диаграммы для чугунов:

а — влияние C и Si на структуру чугуна; *б* — влияние скорости охлаждения (толщины стенки отливки) и C + Si на структуру чугуна; *I* — белые чугуны; *II* — серые чугуны

2,4%. Механические свойства чугуна определяются в первую очередь графитовой составляющей. По структуре чугун можно рассматривать как сталь, пронизанную графитовыми включениями, которые играют роль надрезов, ослабляющих металлическую основу сплава. Поэтому механические свойства чугуна зависят от количества, величины и характера распределения графитовых включений.

Степень графитизации чугуна обусловливает и структуру металлической основы сплава. По мере ее повышения получаются соответственно чугуны с перлитной, перлитно-ферритной и ферритной основой. Чем меньше графитовых включений и чем они мельче, тем выше прочность чугуна. Мелкие и завихренные включения графита придают чугуну более высокие механические свойства. Наиболее неблагоприятная форма графитовых включений — в виде крупных прямолинейных выделений. Графитовые включения мало влияют на предел прочности на сжатие и твердость, которые определяются преимущественно структурой металлической основы чугуна. Разрушающая нагрузка на сжатие в 3—5 раз выше, чем при растяжении. Поэтому чугуны используют для изделий, работающих главным образом на сжатие. Графит повышает износостойкость и антифрикционные свойства чугуна, оказывая «смазывающее» действие. Кроме того, он улучшает обрабатываемость резанием, обусловливая получение сыпучей стружки. Нарушая сплошность металлической основы, графит тем самым придает чугуну малую чувствительность к внешним концентраторам напряжений (дефектам поверхности и т. д.).

По ГОСТ 1412—70 серые чугуны маркируются буквами С — серый и Ч — чугун. После букв следуют цифры. Первые цифры указывают средний предел прочности при растяжении, а вторые — предел прочности при испытании на изгиб. По свойствам и применению серые чугуны можно сгруппировать следующим образом (табл. 1).

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ГОСТ 7293—70) по составу аналогичен обычному серому, но за счет легирования его малыми добавками щелочных, щелочноземельных и редкоземельных металлов и чаще 0,03—0,07 Mg

графит в нем приобретает шаровидную форму. Металлическая основа может быть перлитная, перлитно-ферритная и ферритная. Графит шаровидной формы значительно меньше ослабляет металлическую основу чугуна. В отличие от пластинчатого графита шаровидный графит не является концентратором напряжений. Эти чугуны, обладая хорошими литейными свойствами, высокой обрабатываемостью резанием и износостойкостью, вместе с тем имеют механические свойства, аналогичные механическим свойствам углеродистых сталей. Высокопрочные чугуны маркируют буквами ВЧ с соответствующими цифровыми обозначениями. Отливки из высокопрочного чугуна используют в тяжелом, а также в химическом и нефтяном машиностроении.

1. Основные свойства серых чугунов различных групп

Чугун	Основные свойства	Назначение
Ферритный, ферритно-перлитный (СЧ00, СЧ 12-28; СЧ 15-32; СЧ 18-36)	Структура: перлит, феррит и графит грубый и средней величины. В зависимости от толщины стенок отливок его химический состав: 3,1—3,6% C; 1,8—2,7% Si; 0,5—0,8% Mn; 0,3—0,65% P; 0,12—0,15% S	Для малоответственных деталей, испытывающих небольшие нагрузки в работе
Перлитный (СЧ 21-40, СЧ 24-44; СЧ 28-48; СЧ 32-52; СЧ 36-56; СЧ 40-60)	Структура: мелкопластинчатый перлит с мелкими завихренными графитовыми включениями	Для отливок станин мощных станков и механизмов, для поршней, цилиндров и других деталей, работающих на износ в условиях больших давлений
Модифицированный, относится к перлитным (СЧ 28-48, СЧ 32-52, СЧ 36-56, СЧ 40-60)	Получается добавкой в жидкий чугун с пониженным содержанием C и Si модификаторов, в результате чего отливки имеют перлитную структуру с небольшими включениями изолированных пластинок графита средней величины	То же
Антифрикционный (АСЧ-1, АСЧ-2, АСЧ-3)	Антифрикционные свойства определяются соотношением перлита и феррита в основе и формой графита. При работе с закаленными и нормализованными стальными валами перлита должно быть ⩾ 85% (АСЧ-1 и АСЧ-2). При работе с термически необработанными валами структура чугуна перлитно-ферритная с перлитом ⩾ 60% (АСЧ-3)	Для деталей, работающих при трении

Ковкий чугун (ГОСТ 1215—59) получают путем длительного нагрева при высоких температурах (отжиге) отливок из белого чугуна. В результате графит приобретает хлопьевидную форму, которая меньше понижает прочность и пластичность металлической основы чугуна. В промышленности применяют ферритные ковкие чугуны (металлическая основа — феррит) и реже перлитные ковкие чугуны (металлическая основа — перлит). Ферритные ковкие чугуны более пластичны, чем и объясняется их применение в машиностроении. Чугун имеет пониженное содержание углерода и кремния (2,5—3% C; 0,7—1,5% Si). Более низкое содер-

жание углерода обусловливает повышенную пластичность сплава, так как уменьшает количество графита, выделяющегося при отжиге. Пониженное содержание кремния устраняет выделение пластинчатого графита в структуре отливок при охлаждении. Стливки из ковкого чугуна применяют для деталей, работающих при ударных и вибрационных нагрузках. Ковкий чугун маркируют буквами КЧ и соответствующими цифрами (первые две — предел прочности при растяжении, вторые две — относительное удлинение).

СВАРИВАЕМОСТЬ ЧУГУНА

Сварку применяют главным образом для устранения дефектов в чугунных отливках, при ремонте вышедшего из строя оборудования и в меньшей степени при получении сварно-литых конструкций. Сварка чугуна сопряжена с трудностями. Все перечисленные выше группы чугунов характеризуются пониженной свариваемостью. Наиболее широко применяются и хорошо разработаны процессы сварки деталей из серых чугунов.

Плохая свариваемость чугуна определяется повышенной склонностью сплава к образованию трещин, что обусловлено его низкой прочностью и пластичностью, а также образованию при сварке как в металле шва, так и в околошовной зоне при повышенных скоростях охлаждения хрупких структур в результате отбеливания. Наличие этих структур (ледебурита) ухудшает обрабатываемость чугунов. Трещины в металле шва и в основном металле в зоне термического влияния могут возникнуть от неравномерного нагрева и охлаждения, которые характерны для термического цикла сварки, литейной усадки металла шва, жесткости свариваемых изделий. По данным ИЭС им. Е. О. Патона, на образование трещин влияет не абсолютная доперлитная усадка, а алгебраическая сумма доперлитной усадки и расширения при эвтектическом и эвтектоидных превращениях, с одной стороны, и интенсивность протекания усадки на этих этапах, с другой стороны. По этим данным, при прочих равных условиях, с повышением содержания углерода в сплаве уменьшается литейная усадка и соответственно снижается склонность чугуна к образованию трещин. Трещины при сварке чугуна могут возникать и на других участках детали, в которых вследствие дополнительной деформации, вызываемой сваркой или локальным предварительным подогревом, появляются напряжения, превышающие предел прочности чугуна при растяжении. Холодные трещины развиваются мгновенно. Трещины могут возникать в начале сварки, когда местный нагрев вызывает напряжения сжатия, в процессе сварки, а также при остывании, когда возникают напряжения растяжения.

Для устранения трещин, хрупких и твердых структур в металле шва, т. е. для обеспечения в нем структуры серого чугуна, необходимо обеспечить такой химический состав его и условия охлаждения, при которых наиболее полно осуществляется процесс графитизации. При выборе состава металла шва необходимо учитывать, что графитизирующее действие элементов в условиях сварки проявляется значительно слабей, чем в условиях получения отливок. По сравнению с чугунными отливками в сварном шве для устранения структуры ледебурита необходимо более высокое содержание углерода и кремния. В условиях сварки более сильным графитизатором является углерод. Марганец, относящийся к карбидообразующим элементам, при наличии в шве до 1,0—1,2% и сравнительно низком содержании углерода проявляет себя как графитизатор. Небольшое количество ванадия, хрома и титана способствует измельчению графита и тем самым улучшает механические свойства шва. Графитизирующее действие никеля и меди проявляется слабо. Механические свойства металла шва улучшают модификаторы. Поэтому модификаторы вводят в состав присадочных металлов.

На образование структур отбеливания и трещин в околошовной зоне влияет как термический цикл сварки, так и химический состав и структура свариваемого чугуна. Плохо свариваются чугуны с грубой структурой, с крупными графитными включениями и ферритными зернами. Менее склонны к образованию трещин

мелкозернистые перлитные чугуны с мелкими графитовыми включениями. Улучшают свариваемость чугуна никель и титан, что связано с измельчением под влиянием этих элементов металлической основы сплава и графитовых включений. Плохо свариваются чугуны, долгое время находившиеся под воздействием высоких температур и водяного пара. Для их сварки требуются особые сложные приемы.

При рассмотрении структурных превращений в околошовной зоне при сварке серого чугуна может быть использована тройная диаграмма состояния Fe—C—Si (рис. 2). Наиболее опасным применительно к образованию твердых структур и трещин является участок *1*, примыкающий к сварочной ванне и находящийся в твердо-жидком состоянии. При сварке чугуна без подогрева (при скоростях охлаждения более 5 °С/с) образуется прослойка ледебурита и мартенсита. На образование ледебуритной прослойки в этом участке влияет состав сварочной ванны,

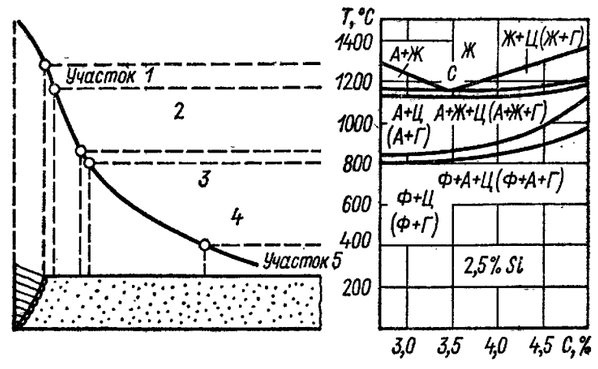


Рис. 2. Диаграмма состояния Fe—C—Si и структурные участки околошовной зоны при сварке чугуна (по данным П. С. Елистратова)

так как в результате диффузионного процесса возможно перераспределение элементов из наплавленного в основной металл и обратно. Эта прослойка может быть полностью устранена при использовании электродов, содержащих повышенное количество графитизаторов или никеля, и при соответствующих режимах сварки. Мартенситная прослойка определяется главным образом режимом сварки, т. е. скоростью охлаждения в интервале наименьшей устойчивости аустенита. На участке *2* металл находится в твердом состоянии и нагрет до высоких температур. При больших скоростях охлаждения в процессе перекристаллизации на этом участке возможно выделение цементита, мартенсита и других структур закалки. На участке *3* неполной перекристаллизации наблюдается измельчение металлической основы. Участок *4* характеризуется увеличением количества графита вследствие распада карбидов. На участке *5* металл нагрет до температуры, не превышающей 400—500° С, и имеет исходную структуру.

Наиболее радикальным средством для устранения отбеливания и закалки, а также трещин в шве и околошовной зоне является предварительный нагрев детали (горячая сварка) с замедленным охлаждением. Благоприятные условия создаются и при процессах, которые осуществляются без расплавления основного металла (пайка, пайкосварка). Для снижения вероятности образования трещин применяют электроды, обеспечивающие получение наплавленного металла, отличного от чугуна.

Классификация способов сварки чугуна по технологическим признакам и свойствам наплавленного металла дана на рис. 3. Многообразие методов вызвано специфическими свойствами чугуна, определяющими его свариваемость, и требованиями, предъявляемыми к сварному соединению и т. д.

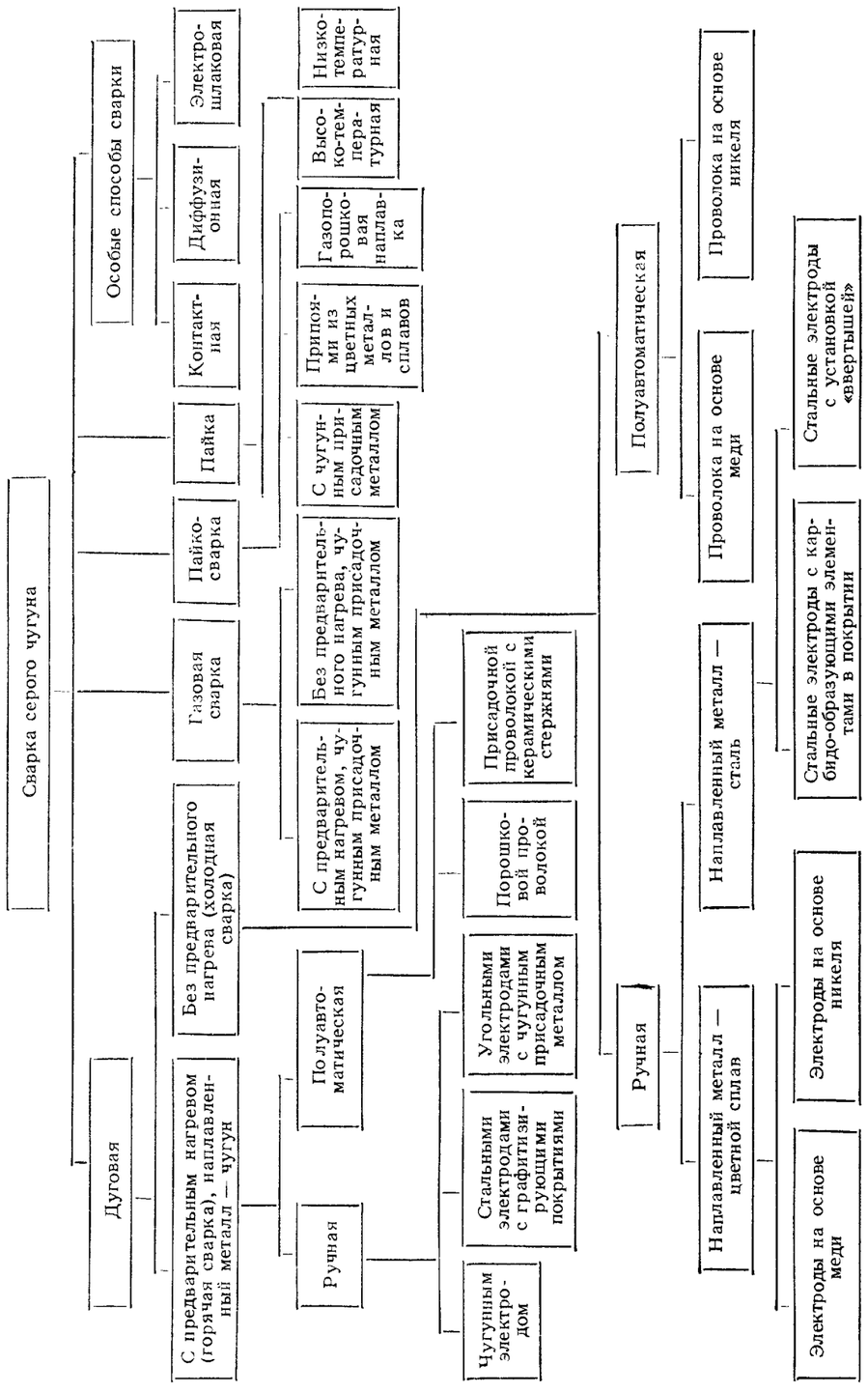


Рис. 3. Классификация методов сварки чугуна

ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СВАРКЕ

Выбор метода сварки и технологические приемы подготовки деталей под сварку определяются размером и местом расположения дефекта. В табл. 2 дана примерная классификация дефектов в чугунных отливках по виду и размерам. Предварительная разделка дефектов перед сваркой может осуществляться механическими способами и воздушно-дуговой резкой, но при различных способах сварки подготовка дефекта под сварку имеет особенности. Поскольку при дуговой сварке с предварительным подогревом процесс, как правило, осуществляется ванным способом на повышенных режимах, то после предварительной разделки, чтобы предотвратить утечку жидкого металла, вокруг дефектного места создается форма из огнеупорной смеси (табл. 3). В большинстве случаев в месте формы приваривают каркас из стальной проволоки диаметром 5—6 мм. При сквозных дефектах каркас устанавливают с нижней стороны дефекта. Внутреннюю часть формы выравнивают гладилкой, после чего стенки укрепляют металлическими шпильками. Форму можно изготовлять из графитовых пластин или из блоков различных огнеупорных материалов. Форма должна обеспечивать высоту наплавленного металла до 5 мм над уровнем поверхности детали. Примеры изготовления форм представлены на рис. 4. При ремонте предпочтительна разделка методом воздушно-дуговой резки или выплавки непосредственной дугой.

2. Классификация дефектов по размерам

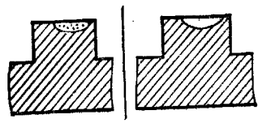
Дефект	Характеристика дефекта	Площадь наплавки или протяженность дефекта	
Несквозной (раковины, ужимины, перекосы)	Мелкий	До 12 см²	
	Крупный	30—120 см²	
Отверстия	Мелкий	В резервуарах без давления: До 200 см²	В резервуарах с давлением: До 20 см²
	Крупный	200—600 см²	20—100 см²
Сквозной (трещины, спан, отбитые части)	Мелкий	В жестком контуре: До 50 мм	В нежестком контуре: До 250 мм
	Крупный	250—600 мм	Св. 600 мм

3. Содержание формовочных смесей, %

Компоненты	Смесь				
	1	2	3	4	Завод «Станколит»
Формовочная смесь (отработанная)	30	30	—	—	—
Белая глина	30	—	40	—	40
Кварцевый песок	40	50	10	85	40
Серебристый графит	—	—	50	—	20
Жидкое стекло	—	20	—	15	—

Примечание: Смеси 3 и завода «Станколит» размешивают на воде до состояния крутого теста.

4. Рекомендуемые способы разделки дефектов под газовую сварку

Дефект	Способ разделки дефектов	Вид дефектов	
		до разделки	после разделки
Раковины, ужимины небольших и средних размеров	Вырубка пневматическим зубилом и дополнительная расчистка пламени горелки в процессе заварки		
Трещины, спаи, отбитые части	Вырубка пневматическим зубилом или расчистка пламени горелки перед заваркой		

Подготовка кромок под газовую сварку (табл. 4) может осуществляться различными механическими способами, а также расплавлением металла в зоне сварки и удалением его присадочным прутком. Этот способ разделки рекомендуется при сварке с целью ремонта.

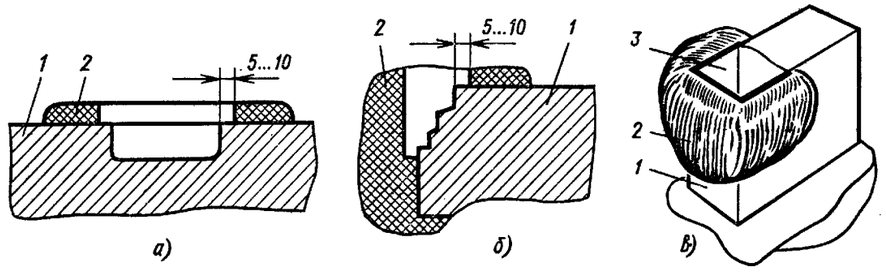


Рис. 4. Схемы изготовления форм при дуговой сварке с предварительным нагревом:

а — в случае несквозной раковины; *б* — при краевом дефекте; *в* — общий вид формы; *1* — деталь; *2* — формовочная смесь; *3* — отглаженная внутренняя поверхность формы

При сварке деталей без предварительного нагрева дефекты, расположенные друг от друга на расстоянии более чем 20 мм, вырубают или высверливают порознь, при более близком расположении — производят сплошную вырубку дефектного участка. Разделка кромок зависит от толщины детали (рис. 5). При глубине дефекта 5—7 мм вырубают фаску с углом раскрытия 70—80°. В местах, доступных для сварки с двух сторон, при толщине стенки более 20 мм производят Х-образную разделку кромок (рис. 5, *б* и *в*).

Если концы трещин не выходят на поверхность детали, то просверливают отверстие и участок с трещиной вырубают или вырезают воздушно-дуговой резкой (рис. 5, *г*).

По концам несквозной трещины просверливают отверстия на глубину 2—4 мм, а по концам сквозной трещины просверливают отверстия на всю глубину сверлом диаметром 6—10 мм. При сварке с целью ремонта рекомендуется выплавка трещины электродом или воздушно-дуговой резкой. Разделку краевых дефектов осуществляют таким образом, чтобы предупредить сколы при механической обработке

(рис. 6). Отбитые части отливок восстанавливают присоединением специальных вставок, вырезанных из листовой стали или отливок по моделям.

При подготовке детали к пайкосварке необходимо полностью удалять все неметаллические включения с поверхности разделки; форма разделки должна обеспечивать свободный доступ пламени горелки.

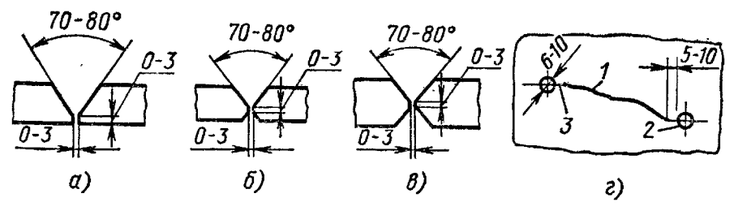


Рис. 5. Схемы разделки трещины:

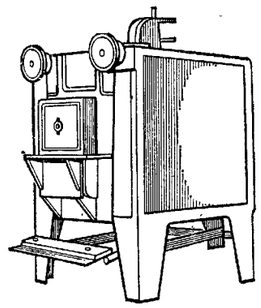
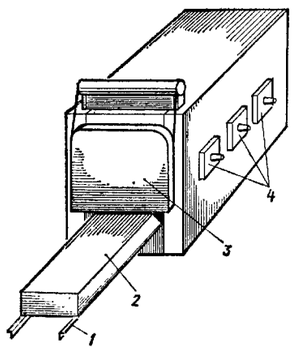
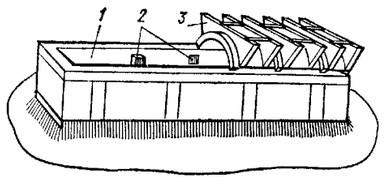
а — одисторонняя; *б* — при толщине стенки до 20 мм; *в* — при толщине стенки свыше 20 мм; *г* — трещина; *1* — трещина; *2* — ограничительные отверстия; *3* — контрольная перемычка

Предварительный нагрев завариваемых деталей является важнейшей операцией. Температура нагрева определяется размерами детали и ее жесткостью, способом сварки, объемом наплавленного металла, химическим составом и структурой чугуна и находится в пределах 400—700° С (табл. 5). Наиболее распространен нагрев до 400—550° С, и только для деталей повышенной сложности и жесткости допускается нагрев до 600—700° С. Дальнейшее повышение температуры нагрева может вызвать резкое снижение прочностных свойств чугуна. Для равномерного подогрева деталей, особенно имеющих стенки разной толщины, скорость нагрева не должна превышать 120—150° С/ч. В зависимости от особенностей производства можно применять различные нагревательные устройства (табл. 6).

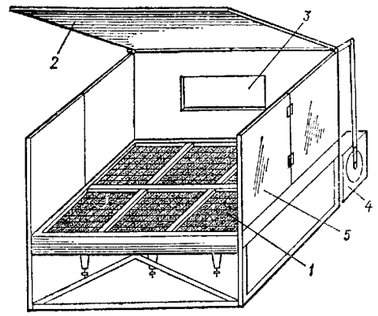
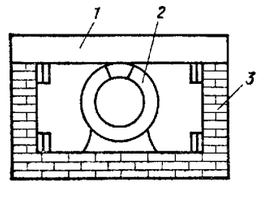
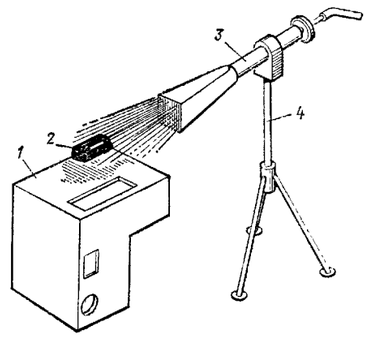
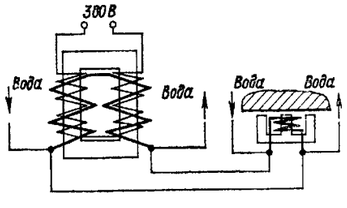
5. Рекомендуемые способы и температура предварительного нагрева чугунных деталей

Дефекты	Способ нагрева	Температура предварительного нагрева, °С	Способы регулирования скорости охлаждения сварного соединения
Мелкие в нежестком контуре (бобышки, платики, выступающие части отливок и пр.)	Местный нагрев сварочной горелкой Местный нагрев переносной газовой горелкой производительностью 5—10 м³/ч	300—400	Нагрев пламенем горелки, постепенно отдаляющейся от сварного соединения в течение 1—2 мин
Крупные в нежестком контуре	Местный нагрев переносной газовой горелкой Местный нагрев в газовом горне	450—600	Нагрев до 600—700 °С, выдержка при этой температуре 1—2 ч. Медленное охлаждение в песке под асбестом или в горне
Мелкие и крупные в жестком контуре. В отливках с массивными узлами, способствующими быстрому теплоотводу	Местный нагрев в газовом горне Общий нагрев в печи с выкатным подом или ямной печи	600—700	Нагрев до 700 °С, выдержка при этой температуре 1—2 ч и охлаждение вместе с печью

6. Нагревательные устройства, рекомендуемые для предварительного нагрева чугуна

Нагреватель	Схема устройства	Область применения
Печи конвейерные (проходные): *1* — корпус печи; *2* — конвейер с поддонами; *3* — рабочее место сварщиков		Массовое производство. Рекомендуется для литейных цехов автомобильных и тракторных заводов и цехов мелкого литья в станкостроении
Печи муфельные		Нагрев автомобильных блоков и им подобных деталей на ремонтных заводах
Печь с выкатным подом: *1* — направляющие; 2 — выкатной под; *3* — заслонка с механизмом подъема; *4* — газовые горелки		На участках среднего и крупного литья в станкостроении
Ямиая печь: *1* — приямок; *2* — газовые горелки; *3* — секция съемной крышки		В цехах крупного литья станкостроения и т. д.

Продолжение табл. 6

Нагреватель	Схема устройства	Область применения
Газовые горны: *1* — панельная горелка; *2* — крышка; *3* — окно для вентиляции; *4* — привод крышки; *5* — дверцы		Универсальное нагревательное устройство для общего, но неравномерного нагрева отливок (деталей) различной массы
Временное нагревательное устройство из огнеупорного кирпича: *1* — съемная крышка; *2* — нагреваемая деталь; *3* — временная кладка		Нагрев различных деталей при сварке с целью ремонта
Переносная газовая горелка: *1* — нагреваемая деталь; *2* — заформованный дефект; *3* — горелка; *4* — штатив		Универсальное средство для местного нагрева
Индукционная установка для нагрева током промышленной частоты		Средство для нагрева деталей в условиях механосборочных цехов

При дуговой сварке без предварительного подогрева режим и технология процесса должны обеспечивать минимально возможную глубину проплавления основного металла (0,5—2,0 мм). Порядок наложения швов выбирают таким образом, чтобы тепло распределялось по всей наплавляемой поверхности. Температура

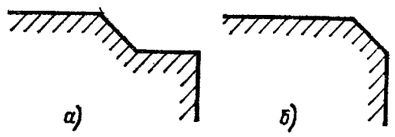


Рис. 6. Схемы разделки краевых дефектов:
а — правильно; *б* — неправильно

нагрева детали в непосредственной близости шва должна быть не выше 100—150° С. После наложения каждого валика дается время на охлаждение места сварки до температуры ниже 100° С. Рекомендуется проковка швов, которая снижает внутренние напряжения и повышает герметичность сварного соединения.

ДУГОВАЯ СВАРКА С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ НАГРЕВОМ (ГОРЯЧАЯ СВАРКА)

Ручную сварку покрытыми электродами используют в мелкосерийном производстве, при сварке с целью ремонта и заварке крупных дефектов в труднодоступных местах отливок.

Сварка электродами с чугунными стержнями находит широкое применение, так как в условиях литейного производства их изготовление не вызывает трудностей. Электроды изготовляют из чугунных прутков диаметром не менее 10 мм марки Б (ГОСТ 2671—70), либо из чугунных прутков, состав которых приведен в табл. 7. Чугунные прутки обеспечивают стабильную и качественную сварку. В состав покрытия вводят компоненты стабилизирующие дугу, шлакообразующие и легирующие металл углеродом и кремнием. Толщина покрытия — не более 0,5 мм на сторону. Наиболее распространенные в промышленности покрытия электродов приведены в табл. 8.

7. Чугунные присадочные прутки

Прутки	Содержание элементов, %							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Ti	Остальные элементы
				не более, при 0,1 Cr				
СТЧ-5а (ТУ «Станколит»)	3,3—3,5	3,4—3,7	0,5—0,7	0,15	0,04	0,1—0,2	—	0,3—0,5 Sn
СТЧ-5б (ТУ «Станколит»)						0,5—0,7	0,1—0,2	2—2,5 Cu
СТФЧ-9 (самофлюсующиеся, ТУ «Станколит»)							—	2—2,5 Cu; 0,01—0,02 Y; 0,01—0,02 Ce; 0,05—0,1 B
УНЧ-2 (ТУ ВНИИАвтогенмаша)		3,5—3,8				0,4—0,6	0,15—0,20	—
ПЧС-1 (ТУ ВНИИЛитмаша)	3,4—3,7	1,2—2,3	0,6—0,7	0,4	0,03	—	—	0,01—0,02 Y; 0,03—0,08 Ce; 0,01—0,02 Ca

8. Составы покрытий электродов для ручной и дуговой сварки чугуна, %

Покрытие	Электроды с чугунным стержнем				Электроды со стальным стержнем
	ОМЧ-1	ВЧ-3	СТЧ-4	ЭПЧ	ЦЧ-5
Мрамор или мел	25	10	—	—	8
Серебристый графит	41	—	25	30	20
Ферромарганец (80%)	9	—	—	—	—
Полевой шпат	25	—	—	—	—
Ферросилиций (75%)	—	30	—	30	—
Карборунд (карбид кремния)	—	60	40	—	40
Плавиковый шпат	—	—	30	—	14
Ферротитан	—	—	—	15	—
Феррофосфор	—	—	—	10	—
Силикокальций	—	—	—	15	—
Алюминиевый порошок	—	—	5	—	7
Поташ	—	—	—	—	1
Чугунный порошок	—	—	—	—	10
Коэффициент массы покрытия, %	10—15	10—15	5—10	10—15	20—23

Сварку осуществляют на переменном токе или на постоянном токе прямой полярности. Электрододержатель должен обеспечивать хороший контакт с чугунным электродом, малый нагрев и хорошую защиту руки сварщика от теплового излучения. В практике нашел применение электрододержатель завода «Станколит» с приваркой чугунного электрода к стальному стержню (рис. 7). При ванной сварке

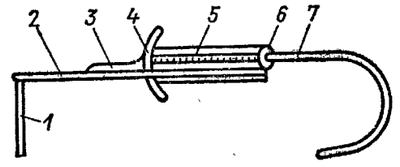


Рис. 7. Электрододержатель для сварки с предварительным нагревом:
1 — электрод; *2* — стальной стержень диаметром 12 мм; *3* — место приварки сварочного кабеля к стержню; *4* — щиток; *5* — рукоятка; *6* — кольцо; *7* — сварочный кабель

сварочный ток 900—1300 А. Перед началом заполнения заформованного дефекта (см. рис. 4) рекомендуется первую порцию расплавленного металла выплеснуть для удаления неметаллических включений и дополнительного нагрева зоны сварки. Во время сварки с поверхности сварочной ванны периодически снимается шлак.

Свойства наплавленного металла в значительной степени зависят от скорости охлаждения и при обеспечении замедленного охлаждения они идентичны свойствам основного металла. Химический состав наплавленного металла по сравнению с исходным составом может отличаться повышенным содержанием кремния.

При заварке мелких дефектов рекомендуется применять электроды марки ЦЧ-5 (табл. 8) со стержнем из низкоуглеродистой стали и покрытием, содержащим графитизирующие элементы. Сварку осуществляют на постоянном токе прямой полярности с использованием стандартного оборудования. Процесс ведется при полужидком металле сварочной ванны, обычно электродами диаметром 5 мм при силе тока 200—250 А. Наплавленный металл имеет следующий химический состав: 2,9—3,1% C; 4,5—5,5% Si; 0,5—0,8% Al; 0,5—0,7% Mn; 0,04—0,07% P; 0,05% S; 0,1% Cr. Механические свойства сварного соединения идентичны свойствам основного металла.

Полуавтоматическую сварку порошковой проволокой используют для заварки крупных дефектов отливок и осуществляют одной или одновременно тремя прово-

локами. В последнем случае производительность процесса 17—20 кг/ч наплавленного металла. Сварка одной проволокой диаметром 2,8—3,2 мм уступает по производительности ручной сварке покрытыми электродами с чугунным стержнем (10—15 кг/ч); поэтому практически чаще применяют сварку тремя проволоками (рис. 8). Возможна сварка одной проволокой, но диаметром 4,5—5,2 мм, производительность которой не уступает производительности при сварке тремя проволоками.

В качестве защитного покрытия горелки (электрододержателя) используют формовочную смесь завода «Станколит» (см. табл. 3), которую в виде обмазки наносят вручную на поверхность горелки.

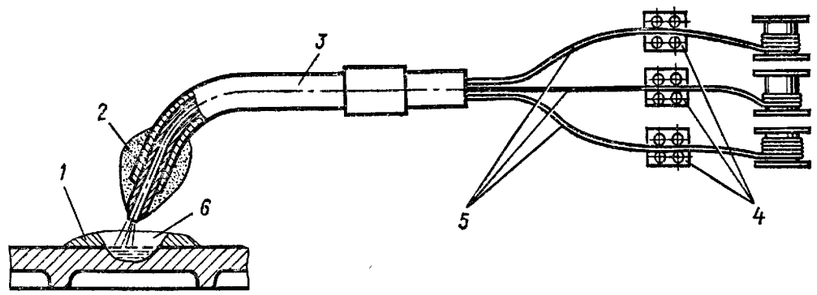


Рис. 8. Схема полуавтоматической дуговой сварки одновременно тремя порошковыми проволоками:

1 — огнеупорная форма; *2* — защитное покрытие горелки; *3* — горелка; *4* — подающие механизмы; *5* — порошковые проволоки диаметром 2,8—3,2 мм; *6* — сварочная ванна

Наиболее часто применяют проволоку следующих марок: ППАНЧ-2 (ТУ ИЭС-48—68), СТЧ-6 (ТУ «Станколит»), ППСВ-7 (ТУ ВНИИКомпрессормаша). Только проволока СТЧ-6 обеспечивает получение наплавленного металла перлитной структуры при относительно высоком (3,2—3,6%) содержании углерода.

Сварку осуществляют на полуавтоматах А-1072, А-1072с и А-765. В качестве источников питания целесообразно использовать сварочные преобразователи ВДМ-1601 и ВДМ-3000. Параметры процесса зависят от скорости подачи проволоки ($I_{св} = 800 \div 1300$ А; $U_д = 40 \div 60$ В). Процесс ведут ванным способом и для повышения производительности на несколько затвердевшую поверхность наплавляемого металла периодически добавляют отдельные куски чугунного лома массой до 200 г. Общая масса лома может достигать 30% массы наплавленного металла. В результате производительность процесса повышается на 20—30% и, например, при сварке тремя проволоками составляет 25—30 кг/ч. Сварное соединение при соблюдении термического цикла процесса по структуре и механическим свойствам идентично основному металлу.

Полуавтоматическая дуговая сварка керамическими стержнями предназначена для заварки мелких дефектов (см. табл. 2) и основана на совместной подаче в дуговой промежуток сварочной проволоки и керамических стержней. Керамические цилиндрические стержни имеют продольный паз; состав их близок к составу электродных покрытий. Эти стержни подаются в зону сварки через направляющую втулку под углом около 45° к сварочной проволоке. Непрерывно подаваемая сварочная проволока и торец опирающегося на проволоку стержня (рис. 9) расплавляются от тепла дуги. После расплавления стержня его заменяют новым. Сварку осуществляют на специализированных полуавтоматах ПС-2 (ЦНИИТМАШ) или А-765.

В связи с повышенными плотностями тока производительность полуавтоматической сварки с использованием керамических стержней в 1,5—2,5 раза превышает

производительность ручной дуговой сварки покрытыми электродами. При этом сохраняется возможность изменения химического состава и свойств металла шва в результате изменения содержания раскисляющих и легирующих элементов в составе керамических стержней. Для сварки чугуна разработан керамический стержень марки ЦСКЧ-3 (ТУ ЦНИИТМАШ), состав которого приведен в табл. 9.

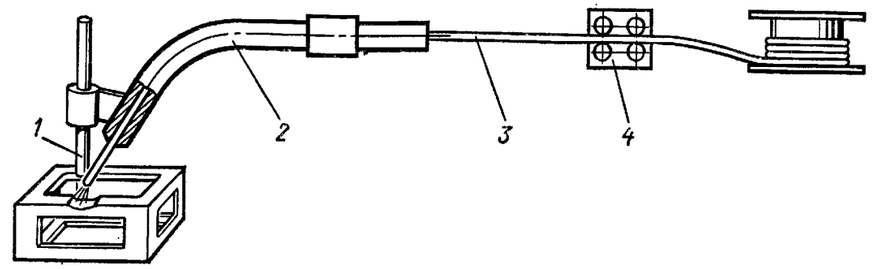


Рис. 9. Схема полуавтоматической дуговой сварки с использованием керамических стержней:

1 — керамический стержень; *2* — горелка; *3* — присадочная проволока; *4* — подающий механизм

В зону сварки можно подавать проволоку различных составов (стальную — мало- и высокоуглеродистую, порошковую), что значительно расширяет технологические возможности этого способа. При требованиях высокой обрабатываемости сварного соединения наилучшие результаты обеспечивает комбинация керамического стержня ЦСКЧ-3 и порошковой проволоки ППЧ-3м (или ППЧ-2).

9. Состав керамических стержней для сварки чугуна

Компоненты	Стержень			Компоненты	Стержень		
	ЦСКЧ-3 *1	ЭЗТМ *2	ВНИИ-Литмаша *2		ЦСКЧ-3 *1	ЭЗТМ *2	ВНИИ-Литмаша *2
Мрамор	15	—	20	Иттриевая лигатура	—	5	—
Плавиковый шпат	33	33	—	Альгинат натрия	—	1	—
Серебристый графит	10	13	15	Фторцирконат натрия	—	—	15
Алюминиево-магниевый порошок	7	9	10	Криолит	—	12	—
Чугунный порошок	10	10	—	Жидкое стекло (св. 100%)	30	30	15
Ферромарганец	—	—	15	Целлюлоза электродная (св. 100%)	5	—	—
Карбид кремния	25	17	—				
Силикомишметалл	—	—	25				

*1 Применяют для сварки серого чугуна. *2 Применяют для сварки высокопрочного чугуна.

Режим сварки должен обеспечивать равномерное плавление стержня, причем должно соблюдаться определенное отношение массы расплавляемого стержня к массе расплавляемой проволоки. Например, при использовании порошковой проволоки ППЧ-3М доля участия стержня составляет 15—20% при следующих параметрах процесса: силе тока 250—350 А, напряжении на дуге 30—36 В, скорости подачи проволоки 170—250 м/ч, скорости сварки 9—12 м/ч. В этом случае наплавленный металл имеет следующий состав: 3,2—3,4% C; 4,0—5,5% Si; 0,5—

0,7% Mn; 0,04% P; 0,04% S; 0,1—0,5% Al; 0,07% Cr. Сварное соединение имеет механические свойства, идентичные механическим свойствам основного металла, а также обрабатываемость, цвет и твердость. Особенностью процесса является обеспечение высокой плотности сварного соединения даже при сварке непосредственно по литейной корке.

Сварка высокопрочного чугуна имеет особенности, так как высокопрочный чугун обладает худшей свариваемостью, чем обычный серый. Сварку применяют для исправления дефектов любых размеров (см. табл. 2) как до, так и после термической обработки отливок, в зависимости от того, на какой стадии их изготовления обнаружен дефект. Можно также применять дуговую сварку с предварительным нагревом и при ремонтных работах.

На практике широко используют дуговую полуавтоматическую сварку порошковой проволокой ППАНЧ-5 (ТУ ИЭС им. Патона) и полуавтоматическую сварку стальной проволокой (или порошковой) с использованием керамических стержней (см. табл. 9). Перед сваркой необходим предварительный нагрев деталей до 500—700° С, а после сварки деталь подвергают отжигу при 800—900° С (выдержка 1,5—2 ч) при скорости охлаждения после выдержки не более 75° С/ч. Отливки, подвергающиеся исправлению до термической обработки, после заварки еще раз отжигают в соответствии с общей технологией. Сварку можно осуществлять ванным способом или последовательным наложением валиков. Режимы сварки в зависимости от состава присадочных материалов представлены в табл. 10. Содержание углерода и кремния в наплавленном металле близко к содержанию указанных элементов в основном металле, а модификаторы, введенные в присадочный металл, обеспечивают получение графита глобулярной формы. Механические свойства сварного соединения после термической обработки отливок должны соответствовать ОСТ 2МТ21—2—76.

10. Режимы дуговой полуавтоматической сварки высокопрочного чугуна

Проволока	$I_{св.}$, А	$U_д$, В	$v_{п.п}$, м/ч	КМС
Порошковая ППАНЧ-5	300—600	26—38	100—280	—
Стальная с керамическим стержнем ЭЗТМ	250—550	30—40	100—320	0,3—0,4
Порошковая «Станколит» или ППАНЧ-2 с керамическим стержнем ВНИИЛИТМАШ	200—550	28—42	100—320	0,15—0,25

Примечание. КМС — коэффициент массы стержня — отношение массы расплавляемого стержня к массе расплавляемой проволоки.

ДУГОВАЯ СВАРКА БЕЗ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА (ХОЛОДНАЯ СВАРКА)

Ручная сварка электродами из цветных металлов на медной основе нашла широкое применение в промышленности. Медь не образует химических соединений с углеродом и практически нерастворима в железе. Поэтому при сварке электродами со стержнем из сплава на основе меди шов получается неоднородным. В медной основе расположены включения высокоуглеродистой железной фазы, часто имеющей мартенситную структуру. На границе сплавления в основном металле создается зона повышенной твердости вследствие образования ледебурита. Поэтому обрабатываемость сварных соединений затруднена. Медно-железные электроды (табл. 11) различной конструкции (с железным порошком в покрытии, с оплеткой из жести, медная трубка со стальным стержнем и т. п.) применяют чаще для заварки трещин (мелких и крупных) при сварке разбитых деталей с обеспечением хороших прочностных показателей сварных соединений. Прочность сварных соединений 18—25 кгс/мм².

11. Электроды со стержнем из сплава на медной основе (медно-стальные) и технология сварки

Электрод	Состав покрытия, %	Технологические приемы	Режим сварки: $d_э$, мм	Режим сварки: I, А	$\sigma_в$ сварного соединения, кгс/мм²
СТЧ-3 (ТУ «Станколит»)	Ферромарганец 36 Мрамор 14 Маршалит 10 Плавиковый шпат 12 Зеленый карборунд 28 Жидкое стекло (св. 100%) 43	Сварку производить в нижнем или наклонном положении небольшими участками длиной 30—80 мм с очисткой и проковкой каждого валика. Возобновляют сварку после охлаждения места сварки до 50—70 °С. Зазоры между кромками при заварке трещин рекомендуется заплавлять стальным электродом	4 5 6 7 «+» на электроде, ток постоянный	140—160 190—210 230—250 280—300	18—25 при *НВ* 160—180 наплавленного металла
ОЗЧ-2 (ТУ 14-4-88—72)	Гематит 30 Железный порошок 30 Полевой шпат 15 Плавиковый шпат 12 Ферромарганец 6 Ферросилиций 2 Никелевый порошок 5 Сода кальцинированная 0,5 (от массы сухой шихты) Силикат натрия 20—26 (от массы сухой шихты)		3 4 5 «+» на электроде, ток постоянный. Длина дуги предельно короткая	90—110 120—140 160—190	75% прочности основного металла

Сварку электродами со стержнем из сплава на основе никеля используют для устранения мелких дефектов прежде всего в тех случаях, когда требуется обеспечить обрабатываемость сварного соединения, а также идентичность его по цвету с основным металлом. Никель неограниченно растворяется в железе, причем образующийся никелевый аустенит растворяет большое количество углерода без образования карбидов, имеет высокую пластичность и низкую твердость. Для изготовления стержней электродов применяют медно-никелевые и железоникелевые сплавы. При выполнении особо ответственных работ используют электроды со стержнем, содержащим более 90% Ni. В табл. 12 приведены составы электродов на основе никеля и краткое описание технологического процесса сварки.

Недостатком этих электродов является значительная усадка, которая при сварке электродами из медно-никелевых сплавов (монеля) ведет к образованию трещин по наплавленному металлу, а при сварке железоникелевыми и никелевыми электродами может привести к трещинам в переходной зоне вследствие более высокой прочности наплавленного металла по сравнению с прочностью чугуна. В связи с этим сварка ведется на режимах, обеспечивающих минимальное проплавление основного металла при малой длине валиков с обязательной проковкой.

Сварку электродами с карбидообразующими элементами в покрытии применяют для заварки мелких дефектов на обрабатываемых поверхностях отливок (не рекомендуется заварка в местах, подлежащих сверлению) вместо электродов со стержнем из монеля. При использовании электрода этого типа углерод, поступающий в шов из основного металла, связывается титаном или ванадием, содержащимся в покрытии, в труднорастворимые в металле мелкодисперсные карбиды, и поэтому углерод, содержащийся в них, не сказывается на фазовых превращениях в наплавленном металле. Структура шва получается ферритной с включениями мелкодисперсных карбидов. Обрабатываемость сварного соединения удовлетворительная.

Наибольшее распространение получили электроды ЦЧ-4 (ТУ ЦНИИТМАШа), содержащие в покрытии феррованадий. Сварку ведут на минимальном токе (23—

Продолжение табл. 12

Марка	Стержень	Состав покрытия, %	Технологические приемы	Режим сварки		$\sigma_в$, кгс/мм²	*HB*
				$d_э$, мм	*I*, А		
			ТУ 14-4-452—73				
ОЗЧ-3	Никель (НП2)	Магнезит обожженный 27 Плавиковый шпат 27 Графит серебристый 9 Доломит 9 Углекислый барий 20 Алюминиевый порошок 2 Титановый порошок 2 Марганец металлический 1 Кремний кристаллический 1 Калиевая селитра 2 Раствор калиево-натриевого силиката 27 (св. 100%)	Сварку производить короткими швами длиной 30—50 мм с проковкой каждого шва и перерывами для охлаждения. Сварку горелого чугуна осуществляют «вразброс». При заварке крупных дефектов или наплавке больших объемов металла используют также электроды ОЗЖН-1. Электродами ОЗЧ-3 наплавлять первый и последний шов, а промежуточные слои наплавлять поочередно	2,5 3 4 5 «+» на электроде, ток постоянный	60—80 80—110 110—130 140—150	42—48	150—170 (первый слой)
			ТУ 14-4-452—73				
ОЗЧ-4	Никель (НП2)	Магнезит обожженный 26 Плавиковый шпат 26 Графит серебристый 6 Марганец металлический 3 Доломит 7 Медный порошок 8 Железный порошок 5 Алюминиевый порошок 3 Ферросилиций 4 Калиевая селитра 2 Углекислый барий 10 Раствор калиево-натриевого силиката 25 (св. 100%)	То же, что и для электрода ОЗЧ-3. Электроды рекомендуются для наплавки последнего слоя при заполнении разделки электродами ОЗЧ-3			23—33	175—190
			ТУ 14-4-318—73				
ОЗЖН-1	Проволока Св-08Н50	Мрамор 20 Плавиковый шпат 10 Магнезит обожженный 9 Углекислый барий 30 Графит 12	То же, что и для электрода ОЗЧ-4			49—53	170
ОЗЖН-1	Проволока Св-08Н50	Марганец металлический 1 Алюминиевый порошок 3 Никелевый порошок 8,0 Титановый порошок 3 Доломит 4 Раствор натриевого силиката 25 (св. 100%)	То же, что и для электрода ОЗЧ-4				
			ЧМТУ 4-332—70				
МНЧ-2	Проволока НМЖМц-28-2,5-1.5	Мрамор 15 Углекислый барий 20 Доломит 22 Плавиковый шпат 15 Ферромарганец 10 Ферросилиций 5 Графит серебристый 13 Сода кальцинированная или поташ 0,5 (от массы шихты) Раствор силиката натрия 24—27 (от массы сухой шихты)	То же, что и для электрода ОЗЧ-3	3 4 5 «+» на электроде, ток постоянный	90—110 120—140 160—190		120—150
			ТУ «Станколит»				
СТЧ-2	Проволока НМЖМц-28-2,5-1,5	Карборунд зеленый 70 Углекислый барий 24 Ферромарганец 5 Бентонит 1 Жидкое стекло 43 (св. 100%)	То же, что и для электрода МНЧ-2. Некоторые краевые дефекты, а также «бобышки» и платики можно наплавлять полужидкой ванной с принудительным формирова-	3 4 5 6 «+» на электроде,	85—100 120—150 180—200 220—240	—	120—150

30 А на 1 мм диаметра электрода) электродами диаметром не более 4 мм. Ток постоянный, полярность обратная. Заварку рекомендуется вести с облицовкой кромок электродами ЦЧ-4 не более чем в два слоя с последующим заполнением объема дефекта стальными электродами типа Э42, Э42А. Предел прочности наплавленного металла $\sigma_в = 49{,}6 \div 51{,}2$ кгс/мм², а твердость *НВ* 170—180.

Сварку стальными электродами мелких и крупных деталей производят в тех случаях, когда не требуется механическая обработка соединений и не оговаривается их прочность. Процесс осуществляют электродами для сварки низкоуглеродистых сталей (предпочтительны электроды УОНИ-13/46) на минимальном режиме, отдельными участками, с перерывами для охлаждения основного металла. Используют также сварку с «отжигающими» валиками, которые наплавляют на уже наплавленные валики без выхода на основной металл. В этом случае структура переходной зоны — тонкопластинчатый перлит с вторичным цементитом. Прочность соединения выше, чем при сварке без «отжигающих» валиков.

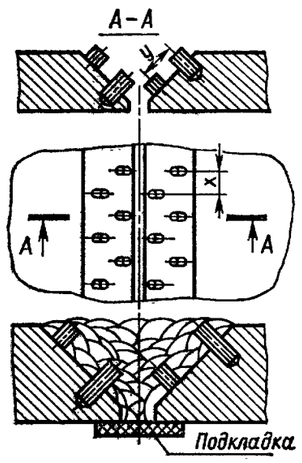


Рис. 10. Схема расположения шпилек и заварка места разделки; $x = 4d$; $y = 2d$ (d — диаметр шпильки, мм)

Ремонт вышедшего из строя оборудования можно производить без демонтажа деталей сваркой с простановкой стальных ввертышей-шпилек (рис. 10). При этом обеспечивается равнопрочность сварного соединения. В этом случае разделка дефекта при толщине детали до 20 мм необязательна. При большей толщине кромки скашивают под углом 90—120°. При толщине стенок детали до 10 мм диаметр шпилек 6 мм, при толщине до 20 мм — 10 мм, а при большей толщине применяют шпильки диаметром 16 мм. Шпильки устанавливают в шахматном порядке. Заварку выполняют следующим образом. Обваривают шпильки и наплавляют на поверхность чугуна стальное покрытие. Эти операции можно производить электродами ЦЧ-4 или электродами со стержнем из сплавов на основе никеля. Сварку ведут с минимально возможной глубиной проплавления, участками 48—50 мм с перерывами для охлаждения. После заполнения разделки заваренный участок усиливают приваркой стальных прутков. По поверхности наплавки укладывают слой «отжигающих» валиков.

Полуавтоматическая сварка проволоками из цветных металлов основана на тех же особенностях, что и сварка покрытыми электродами со стержнем из цветных металлов. Применяют проволоку МРЗКМцТ (ТУ 48-21-80 — 72), следующего состава: 0,2—0,4% РЗЭ; 0,2—0,4% Si; 0,8—1,2% Mn; 0,2—0,4% Ti; Cu — остальное. Полуавтоматическая дуговая сварка указанной проволокой обеспечивает повышение производительности по сравнению с ручной сваркой и значительно снижает количество выделяющихся аэрозолей, содержащих медь. Сварку осуществляют полуавтоматами А-765, А-825 и т. п. в среде защитного газа (углекислый газ, азот) или без дополнительной защиты проволоками диаметром 1,6—2,0 мм на постоянном токе обратной полярности при следующих режимах: сила тока 180—250 А; напряжение дуги 25—35 В; скорость подачи проволоки 170—250 м/ч; скорость сварки 25—36 м/ч; расход защитного газа 5—10 л/мин. Длина валика, выполняемого за один проход, 200—300 мм. Сварка ведется с перерывами для охлаждения с проковкой каждого шва. Прочность сварного соединения, выполненного в среде защитного газа, 23—28 кгс/мм², а без дополнительной защиты 16—18 кгс/мм².

Полуавтоматическая сварка проволокой на основе никеля предназначена для ремонта тонкостенных чугунных деталей автотракторного оборудования, а также для устранения мелких дефектов, вскрывшихся в процессе механической обработки отливок. Применяют никелевую проволоку ПАНЧ-11 (ТУ ИЭС им. Патона). Редкоземельные элементы, входящие в состав проволоки, обеспечивают ее самозащитные свойства. Для сварки используют полуавтоматы А-825 и др., рассчитанные на подачу тонкой присадочной проволоки диаметром не более 1,6 мм. Указанный процесс целесообразно использовать при сварке металла толщиной не более 10 мм. Разделку осуществляют узким абразивным кругом; ширина ее должна быть не более 5—6 мм. При заварке трещин, например, в блоках цилиндров через каждые 30—50 мм просверливают отверстие. Сварку ведут обратноступенчатым методом или отдельными валиками в один-два слоя. Длина каждого шва 30—50 мм. Сварное соединение подвергают легкой проковке. При наличии дефектов в жестком контуре нужен предварительный нагрев до 200—300 °С. Сварку осуществляют на постоянном токе прямой полярности при следующих режимах: сила тока 100—150 А; напряжение дуги 14—19 В; скорость подачи проволоки 100—150 м/ч; скорость сварки ~8 м/ч. Наплавленный металл имеет аустенитную структуру с равномерно распределенными включениями углерода. Зона сплавления характеризуется отсутствием свободных карбидов и ледебурита. Прочность наплавленного металла 30—40 кгс/мм².

Сварка высокопрочного и ковкого чугуна имеет особенности, так как высокопрочный чугун обладает повышенной склонностью к отбеливанию и большой прокаливаемостью. Заварка дефектов в отливках из ковкого чугуна и ремонтная сварка затрудняются повышенной графитизацией металла, что ухудшает смачиваемость поверхности разделки при сварке. Сварку без предварительного нагрева используют для исправления мелких дефектов отливок и при ремонте. Заварка может осуществляться как до термической обработки отливок, так и после нее.

Подготовка под сварку дефектов, обнаруженных до термической обработки, осуществляется абразивным инструментом или воздушно-дуговой резкой. Сварку осуществляют электродами УОНИ-13/45 или УОНИ-13/55. Можно также использовать полуавтоматическую сварку стальной проволокой в среде углекислого газа. Однако предпочтение следует отдать сварке электродами со стержнем из сплава на основе никеля (см. табл. 12).

Дефекты, обнаруженные после термической обработки, разделывают обычным способом и заваривают электродами со стержнем из сплава на основе никеля. Механические свойства сварных соединений и обрабатываемость соответствуют свойствам и обрабатываемости основного металла.

ГАЗОВАЯ СВАРКА

Сваркой с предварительным нагревом (горячая) исправляют преимущественно мелкие и в отдельных случаях крупные дефекты на поверхностях отливок до механической обработки и после нее при наличии припуска 1—5 мм.

Газовую сварку осуществляют как с общим, так и с местным нагревом с получением наплавленного металла, имеющего структуру серого чугуна. В качестве горючего газа используют ацетилен, пропан-бутан и городской газ, а в качестве присадочного материала при сварке чугуна можно использовать чугунные прутки А и Б (ГОСТ 2671—70). При их применении графитизация углерода в наплавленном металле в условиях сварки с предварительным нагревом обеспечивается повышенным содержанием кремния при относительно невысоком содержании углерода. В результате наплавленный металл имеет преимущественно ферритную структуру, что не всегда отвечает техническим условиям на чугунные отливки. На заводе «Станколит» созданы специальные малолегированные чугунные присадочные прутки. Содержание в прутках олова, меди и никеля способствует созданию в наплавленном металле перлитной структуры. Кроме того, прутки обеспечивают получение более плотного наплавленного металла. При этом лучшими технологическими свойствами обладают прутки с исходной ледебуритной структурой («отбеленные»); недопустимы для газовой сварки прутки, имеющие грубый

излом с явно выраженными крупными включениями графита. Такие чугуны отличаются повышенной вязкостью, так как в расплаве имеется большое количество нерастворившихся блоков графита. Их растворение зависит от скорости диффузии углерода, которая интенсивней в расплаве, полученном из отбеленного чугуна.

При сварке чугуна применяют преимущественно кислые флюсы, состоящие из борсодержащих веществ. Одной из основных задач флюса является перевод образующегося SiO_2 в более легкоплавкие соединения, например Na_2OSiO_2. В связи с этим при выборе состава флюса из бористых соединений предпочтение отдают буре $Na_2B_4O_7$, которая при разложении выделяет Na_2O и B_2O_3. Отшлакование SiO_2 возможно также и с помощью углекислых солей натрия или калия. Например, при ремонте тонкостенных отливок углекислый натрий успешно применяют в качестве флюса, так как имеются условия для удаления из ванны CO_2. Составы наиболее распространенных флюсов для сварки чугуна приведены в в табл. 13.

13. Состав флюсов для газовой сварки, %

Компоненты	Номер флюса						
	1	2	3	4	5	6	7
Бура:							
плавленая	100	—	—	—	—	23	—
прокаленная	—	100	—	56	—	—	50
техническая	—	—	100	—	50	—	—
Углекислые:							
натрий	—	—	—	22	—	27	—
калий	—	—	—	22	—	—	—
Натрий:							
азотнокислый	—	—	—	—	—	50	50
двууглекислый	—	—	—	—	50	—	—
Керосин, св. 100%	—	—	—	—	—	—	4

Примечание. Флюсы, содержащие соду, рекомендуются для заварки тонкостенных отливок (мелких дефектов). Флюсы на основе плавленой или прокаленной буры не подлежат длительному хранению.

Все порошковые флюсы, применяемые для газовой сварки, обладают некоторыми технологическими недостатками. Подача флюса в ванну производится обычно на конце присадочного прутка. Например, в результате недостаточной подачи его возникает пористость, а при избытке — шлаковые включения. Равномерный шлаковый покров на поверхности сварочной ванны может быть достигнут при применении газообразного флюса, например БМ-1, или флюса в виде обмазки. Так как для использования газообразного флюса необходимы специальная аппаратура и обезвоженные горючие газы, предпочтительнее второй способ. Флюс-покрытие имеет следующий состав (в частях по массе): прокаленная бура 22, борная кислота 10, глицерин 5, вода 15—20. Такое покрытие изготовляют из тщательно смешанных компонентов, которые подвергают кипячению в водном растворе глицерина. Раствор доводят до кипения и наносят на прутки методом окунания или кистью. Толщина слоя покрытия составляет 0,5—1,0 мм на сторону. Обмазанные прутки просушивают при 90—110 °С в течение 10—12 ч.

Процесс сварки начинается с прогрева основного металла вокруг участка дефекта пламенем горелки до светло-красного цвета (~850 °С). Затем пламя сосредоточивается на поверхности разделки, которая доводится до плавления. Расплавление производится восстановительной частью нормального пламени. Стенки места дефекта расплавляются и с помощью чугунного присадочного прутка очищаются от неметаллических включений. Сварку следует вести ванным способом. При заварке краевых дефектов (бобышек, платиков, бортиков, уголков)

сварщик, маневрируя пламенем горелки и прутком, не должен допускать стекания жидкого металла. Наплавленный металл должен возвышаться над основным металлом не менее чем на 3 мм.

Для обеспечения нормальной твердости сварного соединения после сварки необходимо замедлить скорость охлаждения металла в интервале температур, отвечающих перлитным превращениям. Горелку медленно отводят от поверхности ванны на расстояние 50—60 мм и наплавленный металл выдерживают под действием пламени в течение 0,5—1,5 мин. Заваренную таким образом деталь для замедленного охлаждения засыпают сухой землей или покрывают листовым асбестом. Отливки сложной конфигурации и большой толщины после сварки рекомендуется подвергать отжигу. Сварное соединение и наплавленный металл при сварке деталей из серого перлитного чугуна обладают теми же свойствами, что и основной металл.

Сварку без предварительного нагрева (холодную сварку) применяют в тех случаях, когда детали (кронштейны, рычаги и т. д.) при нагреве и охлаждении способны свободно деформироваться, не вызывая значительных остаточных напряжений. Мощность пламени горелки в этих случаях должна быть достаточной, чтобы обеспечить замедленную скорость охлаждения в процессе кристаллизации в интервале перлитных превращений сварного соединения. При газовой сварке этот процесс лишь условно можно отнести к холодной сварке, так как фактически имеет место местный нагрев основного металла в области дефекта и прилегающих зон пламенем горелки. Технологический процесс сварки без предварительного нагрева аналогичен сварке с предварительным нагревом, но отличается некоторыми особенностями. Допускается как механическая предварительная разделка, так и разделка в процессе сварки воздействием на расплавленный металл присадочного прутка и газового пламени. Последний способ разделки дефекта обусловливает некоторый предварительный нагрев чугуна и способствует снижению скорости охлаждения сварного соединения. При холодной сварке применяют те же сварочные материалы, что и при горячей. После окончания заварки места дефекта следует медленно отводить горелку в течение 2—3 мин, воздействуя пламенем на прилегающие участки. Деталь или часть детали, на которой расположен заваренный участок, для замедленного охлаждения рекомендуется засыпать песком или укрыть листовым асбестом. Твердость наплавленного металла на 20—30 единиц *HB* выше твердости основного металла. При этом наплавленный металл имеет хорошую обрабатываемость и высокую плотность.

Газовую сварку с целью ремонта выполняют теми же присадочными материалами, флюсами и приемами, которые были приведены выше. Однако технология ремонтной сварки имеет некоторые особенности. Чугунные детали часто эксплуатируют в условиях воздействия высоких температур. При этом образуются участки с резко измененными свойствами — «горелый чугун». Последний иногда совершенно не поддается сварке, и поэтому такую деталь бракуют. Если при технологической пробе обнаруживается неполное изменение свойств чугуна, то можно получить сварное соединение, достаточно надежное по прочности. Особенность техники газовой сварки таких дефектных участков заключается в расчистке свариваемой поверхности. Для этого основной металл на отдельных участках оплавляют и с помощью стального скребка (при обильном введении флюса) с кромок разделки удаляют землистые пленки до появления качественного металла. На очищенный участок наносят присадочный металл. Таким же образом расчищают и наплавляют следующие участки до полной облицовки места разделки дефекта слоем наплавленного чугуна. После этого шов заполняют по всему сечению.

При ремонтной сварке часто разделку кромок под сварку (особенно при сварке трещин) производят пламенем горелки, совмещая эту операцию с процессом сварки. С помощью прутка и пламени вдоль трещины создают фаску, глубина которой определяется толщиной стенок. Сварочную ванну наводят таких размеров, чтобы был обеспечен провар трещины больше, чем наполовину. Затем операцию повторяют с другой стороны детали. При невозможности выполнения двусторонней сварки, процесс ведут с проваром на всю толщину при использовании подкладок (из

асбеста, графитовых пластинок, огнеупорного кирпича, глины и т. п.). Такой способ прост и удобен в исполнении. В процессе устранения дефекта происходит подогрев кромок, замедляющий последующее охлаждение чугуна и уменьшающий возможность образования отбела.

ПАЙКОСВАРКА

Дефекты, вскрывшиеся в отливках на последних стадиях механической обработки, сваркой плавлением исправлять невозможно, так как высокий нагрев основного металла приводит к необратимому «росту» чугуна и к значительным деформациям изделия. Поэтому дефекты, выявленные на финишных операциях обработки резанием, устраняют методами пайкосварки. Процесс в этом случае осуществляют без расплавления основного металла; соединение, как и при пайке, получается за счет более легкоплавкого металла припоя. Исключением является пайкосварка чугуна чугунными припоями, когда соединение образуется за счет поверхностно-активных флюсов и особых технологических приемов, позволяющих нагревать основной металл до температуры ниже температуры солидуса металла припоя. Такими же приемами осуществляют низкотемпературную пайкосварку латунными припоями. Для осуществления этого процесса с поверхности основного металла должны быть удалены окислы, жир и другие загрязнения; дефекты необходимо разделывать механическими способами (вырубкой, фрезерованием, сверлением, строганием). При разделке сквозных трещин притупление кромок должно быть не более 1,5 мм. Кромки разделывают, как и при сварке. При низкотемпературной сварке в начале процесса жидкая ванна не образуется, и металл наплавляют отдельными каплями. Капли жидкого присадочного металла, попадая на основной металл, нагретый до температуры ниже температуры солидуса металла припоя, и соприкасаясь с ним, отдают ему часть своей теплоты, вследствие чего повышается температура поверхностного слоя основного металла. Капля жидкого припоя под воздействием флюса и давления пламени легко растекается тонким слоем по основному металлу. Часть жидкого металла под действием капиллярных сил заполняет пустоты, образующиеся в чугуне в результате поверхностного выкрашивания или окисления графита.

При низкотемпературной пайкосварке влияние свободного графита на процесс смачивания устраняют активными добавками, вводимыми во флюс. Флюс, взаимодействуя со свободным углеродом, разрыхляет последний, что, в свою очередь, снижает межфазную поверхностную энергию и улучшает условия смачивания. Кристаллизация наплавленного металла в несплошностях основного металла, а также взаимная диффузия атомов на границе сплавления обусловливает прочное паяносварное соединение.

Низкотемпературную пайкосварку чугунным припоем применяют для исправления мелких дефектов на поверхности чугунных деталей, имеющих незначительный припуск на обработку, при необходимости получения структур чугуна в наплавленном металле. Она не исключает применения предварительного нагрева детали. Предварительный нагрев до 300—400 °С облегчает выполнение работы при исправлении дефектов на толстостенных изделиях. При массовом поступлении отливок на исправление он увеличивает производительность труда и улучшает качество. В качестве присадочного материала используют чугунные прутки диаметром 6 мм, состав которых указан в табл. 7. Лучшие результаты обеспечиваются при применении прутков УНЧ-2 и СТФЧ-2. Флюс МАФ-1 состава, %: бура плавленная 33; сода кальцинированная 12; селитра натриевая 27; окись кобальта 7; фтористый натрий 12,5; фторцирконат калия 8,5; флюс наносят на поверхность разделки после ее нагрева до 300—400 °С. Расплавление флюса является индикатором для начала плавления припоя. Флюс МАФ-1 и прутки УНЧ-2 позволяют вести процесс при более низкой температуре нагрева основного металла (порядка 700—800 °С). Твердость наплавленного металла *НВ* 230—260; прочность на растяжение 16—20 кгс/мм^2.

Пайкосварку латунными припоями применяют при сварке с целью ремонта, когда разность в цвете и твердости основного и наплавленного металла не является браком и деталь может быть подвергнута механической обработке для устранения коробления, изменения размеров и т. п. Графит из металла поверхности кромок удаляют выжиганием его на глубину 0,2—1,5 мм. Для этого кромки детали, подлежащие соединению, покрывают пастой, состоящей из железных опилок и борной кислоты, и нагревают пламенем горелки или окислительным пламенем приблизительно до 900 °С. В качестве присадочного материала можно использовать латунь Л63 или ЛОК59-1-03 (ГОСТ 16130—72). Припой ЛОК59-1-03 обеспечивает получение более плотного паяносварного шва и бездымный процесс. Пайкосварку указанными припоями осуществляют с помощью флюсов следующих составов: 1) бура 100%; 2) бура 50%, борная кислота 50%. Однако часто возникает потребность в исправлении дефектов на поверхности чугунных деталей с припуском на обработку в несколько микрометров, причем в некоторых случаях требуется обеспечить цвет и твердость шва, близкие к цвету и твердости основного металла. Для исправления дефектов на подобных поверхностях используют низкотемпературную пайкосварку латунными припоями, которая по технологическим приемам близка к описанному выше процессу низкотемпературной пайкосварки чугунным присадочным материалом. Температура пайкосварки латунными припоями, т. е. местный нагрев поверхности металла в зоне наплавки, 650—750 °С. Снижение температуры указанного процесса по сравнению с обычными способами пайкосварки латунными припоями стало возможным за счет использования специальных флюсов (табл. 14).

14. Составы флюсов для низкотемпературной пайкосварки латунными припоями, %

Флюс	Углекислый литий	Сода кальцинированная	Борная кислота	Солевая лигатура*	Область применения
ФПСН-1	25±0,5	25±1	50±1	—	Для латуни, не содержащей Al
ФПСН-2	22,5±0,5	22,5±0,5	45±1	10±1	Для латуни с содержанием до 1% Al

* Состав плавленой лигатуры: 72,5% NaCl; 27,5% NaF.

В качестве припоя в зависимости от требований, предъявляемых к поверхности, на которой расположен дефект, можно применять припой ЛОК59-1-03 или ЛОМНА 49-05-10-4-04 (ТУ 48-21-305—74). Припой ЛОК59-1-03 используют в тех случаях, когда к наплавленному металлу не предъявляются требования одноцветности и одинаковой твердости с основным металлом. Предел прочности паяносварных соединений при растяжении в среднем 24 кгс/мм^2. Твердость наплавленного металла *НВ* $\leqslant$ 100, т. е. значительно ниже твердости чугуна. Металл, наплавленный припоем ЛОМНА, имеет твердость *НВ* 170—200, что близко к твердости серого чугуна. Прочность паяносварного соединения на разрыв достигает 30 кгс/мм^2.

Газопорошковая сварка предназначена для исправления мелких дефектов чугунных отливок, вскрывшихся на последних операциях механической обработки. Для наплавки на чугун разработаны порошки на никелевой основе, обладающие самофлюсующими свойствами (табл. 15).

Этот процесс выполняют в две стадии — напыление и последующее расплавление напыленного слоя. Процесс осуществляют при подаче порошковых материалов в ванну через пламя горелки. Наплавка осуществляется по следующей схеме: а) поверхность, подлежащую наплавке, нагревают пламенем ацетилено-кислородной горелки ГАЛ-2 до 300—400 °С; б) на подогретую поверхность этой же горелкой напыляют слой порошкообразного сплава, не доведенного до расплав-

ления; этот слой предохраняет поверхность от окисления; в) на напыленную поверхность, как на подкладку, наплавляют порошкообразный сплав; при этом чугун отливки нагревается незначительно. Таким образом, основной металл не подвергается значительному тепловложению, не претерпевает структурных изменений; при этом сохраняются геометрические размеры окончательно обработанных деталей.

15. Состав порошкообразных сплавов

Марка	Химический состав, %*		
	Cu	B	Si
НПЧ-1	5,0—7,0	1,0—1,8	0,7—0,95
НПЧ-2	5,0—7,0	1,7—2,3	1,0—2,5

* Остальное никель.

Порошки НПЧ-1 (твердость наплавки *НВ* 220) и НПЧ-2 (твердость наплавки *НВ* 300) различаются содержанием B и Si. Повышение количества B и Si, вводимых в порошок, снижает температуру плавления сплава и повышает его твердость. Порошок НПЧ-1 используют при исправлении дефектов на поверхностях, подвергающихся последующей обработке режущим инструментом, а порошок НПЧ-2— для исправления дефектов, вскрывшихся на поверхностях, подвергающихся поверхностной закалке (до и после нее). Иногда при исправлении глубоких дефектов применяют комбинированный метод (обычно при поверхностной закалке направляющих станков), заключающийся в предварительном заплавлении дефекта дуговой сваркой электродами МНЧ-2 и последующем перекрытии слоя газопорошковой наплавкой. Прочность сварного соединения 16—23 кгс/мм².

ОСОБЫЕ ВИДЫ СВАРКИ

Контактная сварка чугуна и чугуна со сталью позволяет получить надежное сварное соединение. Этот способ применяют для сварки труб и стержней. Сварку выполняют с оплавлением при предварительном нагреве (предварительное оплавление). Поэтому дополнительные меры по снижению скорости охлаждения не требуются. По линии оплавления и в околошовной зоне, независимо от исходной структуры металлической основы, образуется перлитно-ферритная структура. При сварке чугуна с крупнопластинчатым графитом не удается получить удовлетворительных результатов. Сварку труб, получаемых центробежным литьем, осуществляют на режимах, указанных в табл. 16.

16. Режимы контактной сварки чугуна

Режим сварки	Размеры труб, мм		
	d=50; $\delta = 4 \div 5$	d = 100; δ = 5	d = 100; δ = 10
Вторичное напряжение холостого хода, В . . .	6	6	7,55
Суммарный припуск, мм:			
на оплавление и подогрев	10	12	20
на осадку	3—3,5	3,5	3,5
Скорость перемещения подвижной плиты, мм/с	1,6	1,6	2
Усилие осадки, кгс	33	50	130
Время сварки, с	10—12	36	—

Диффузионную сварку применяют прежде всего для соединения чугуна с цветными металлами, а также с неметаллами (графит, керамика и т. п.). Процесс осуществляют при 700—800 °С в вакуумной камере. Структурных изменений в результате сварки не наблюдается. Надежное сварное соединение образуется при разрежении до 10^{-3} мм рт. ст. Температура процесса может быть снижена при уменьшении шероховатости свариваемых поверхностей, увеличении разрежения, давления и времени сварки.

Электрошлаковая сварка чугунных изделий по технике выполнения мало отличается от сварки стальных изделий. Свариваемые чугунные изделия собирают с зазором несколько большим, чем при сборке стальных изделий. Применяют медные охлаждаемые или остающиеся стальные подкладки. В качестве электрода используют пластины, состав которых аналогичен составу основного металла. При заварке крупных дефектов сварку выполняют неплавящимися графитовыми электродами с подачей в ванну расплавленного металла со стороны. Применяют флюс АН-348А с добавкой мела. Механические свойства и структура сварного соединения удовлетворительные. Этот способ не получил широкого распространения вследствие трудоемкости подготовительных работ, сложности и малой маневренности оборудования.

Глава 16

СВАРКА И ПАЙКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ СО СТАЛЬЮ

Режущий инструмент имеет рабочую (режущую) часть и корпус. Рабочую часть изготовляют из инструментального материала (целиком или только режущие элементы), корпус — из конструкционной стали. Инструментальные материалы в соответствии с назначением отличаются высокими твердостью и износостойкостью, сохраняемыми при нагреве, хрупкостью, малой адгезионной способностью к материалам, обрабатываемым резанием. По химическому составу и физико-механическим свойствам они отличаются от конструкционных сталей, из которых изготовляют корпус инструмента. По физической природе они относятся к неметаллическим материалам, металлоподобным и металлическим.

Неметаллические инструментальные материалы (синтетические алмазы и кубический нитрид бора в разных модификациях, оксидная и оксидно-карбидная минералокерамика) по сравнению с другими инструментальными материалами имеют наибольшую твердость и относительно низкую прочность, хрупки, металлами не смачиваются.

Относящиеся к металлоподобным материалам металлокерамические твердые сплавы имеют свойства, определенные свойствами их основных компонентов (карбидов вольфрама, титана, тантала и сложных растворов на их основе). Твердые сплавы не пластичны, смачиваемость твердых сплавов металлами ограничена и определяется содержанием в них металлической связки — кобальта, никеля, молибдена. Для режущих инструментов наиболее распространены вольфрамовые и титановольфрамовые твердые сплавы с кобальтовой связкой. Безвольфрамовые твердые сплавы имеют никелемолибденовую связку. В вольфрамовую группу входят твердые сплавы, содержащие карбид вольфрама, в титано-вольфрамовую — твердые сплавы, содержащие монокарбид вольфрама и сложный карбид системы WC—TiC (твердый раствор карбида титана в карбиде вольфрама), а также твердые сплавы, содержащие один сложный карбид системы WC—TiC. Структурные превращения в твердом сплаве при нагреве для пайки и последующем охлаждении (за исключением нагрева в печах, отличающегося большой длительностью по сравнению с индукционным нагревом) практически отсутствуют.

Заготовки для режущей части инструментов из неметаллических и металлоподобных инструментальных материалов получают прессованием. Заготовки из металлокерамических твердых сплавов можно обрабатывать резанием после предварительного спекания. В окончательном виде, когда материал приобретает свои служебные свойства, в том числе высокую твердость, заготовки подвергают только шлифованию и затачиванию. Следовательно, операция присоединения режущего элемента из инструментального материала к корпусу является сборочно-присоединительной.

Сочетание инструментальных материалов с конструкционной сталью характеризуется большой химической, структурно-фазовой, механической неоднородностью и различием теплофизических свойств. Чем выше эксплуатационные свойства инструментальных материалов, тем сложнее их соединять с корпусом. Рабочую часть из быстрорежущей стали соединяют с корпусом сваркой и пайкой, твердые сплавы — преимущественно пайкой. Неметаллические инструментальные материалы без применения специальной технологии и особых припоев, обеспечивающих смачиваемость их, пайкой соединить нельзя.

Конструкционные и инструментальные стали для сварного инструмента и корпусов паяного инструмента относятся к группе углеродистых и низколегированных. Для инструментов сварной конструкции используют стали в отожженном состоянии или после нормализации со структурой феррит + перлит; для инструментов паяной конструкции стали могут быть термически обработанными.

Для изготовления рабочей части режущего инструмента наибольшее применение имеют вольфрамомолибденовые и вольфрамомолибденокобальтовые быстрорежущие стали. Они являются высоко- и сложнолегированными сплавами. Суммарное содержание легирующих элементов (вольфрама, молибдена, ванадия, хрома, кобальта) в них до 50%; содержание углерода 0,7—1,2%. Эксплуатационные свойства быстрорежущие стали приобретают после сложной термической обработки — закалки с окончательным нагревом до температуры выше 1200° С и многократного высокого отпуска (560° С).

Требуемая форма рабочей части и режущих элементов из быстрорежущей стали достигается механической обработкой резанием заготовки в отожженном состоянии; можно применять также предварительное пластическое формообразование заготовки.

Критическая скорость охлаждения при закалке быстрорежущей стали с температуры аустенизации 1,5—3° С. Следовательно, сталь, нагретая выше 900° С, даже при охлаждении на воздухе получает закалку. Поэтому качественное соединение элементов из быстрорежущей стали с корпусом инструмента сваркой плавлением получить технологически сложно. В зависимости от условий нагрева и охлаждения при сварке быстрорежущая сталь в зоне термического влияния получает различные структуры. Сварка способствует также появлению в соединении остаточных напряжений. Химическая и структурно-фазовая неоднородность соединения быстрорежущая сталь — конструкционная сталь усиливается после отжига вследствие диффузионных процессов в соединении.

1. Физические свойства инструментальных материалов [1, 2, 5]

Параметр	Сталь 45 отожженная	Минералокерамика ЦМ 332	Твердый сплав Т15К6	Быстрорежущая сталь Р18		Кубический нитрид бора	Твердый сплав ВК8	Синтетический алмаз
				Закалка, отпуск	Отжиг			
Коэффициент теплового насыщения, кал/(см²·°С·с$^{1/2}$)	0,32	0,19	0,21	0,20	0,24	0,235	0,32	0,38
Коэффициент температуропроводности, см²/с . . .	0,13	0,06	0,095	0,05	0,075	0,18	0,32	0,83
Коэффициент теплопроводности, кал/(см · с · °С)	0,115	0,046	0,065	0,045	0,067	0,1	0,18	0,35
Удельная теплоемкость, кал/(г · °С)	0,112	0,2	0,06	0,105	0,10	0,16	0,04	0,12
Температурный коэффициент линейного расширения, $\times 10^6$, 1/°С	13	7,9—8,2	6,2*	9	~12	2,5—4,7	3,6—3,7	0,9—1,45
Плотность, г/см³	7,85	3,85—3,9	11,1—11,6	8,73	8,7	3,45—3,47	14,4—14,8	3,48—3,54
Удельное сопротивление, мкОм · см.	15,1	—	44*	—	38	—	20,7	—

* Для твердого сплава марки Т14К8.

Сварка и пайка инструментальных материалов со сталью определяется их теплофизическими свойствами (табл. 1). Так как использование режущего инструмента сопровождается его нагревом и охлаждением, то они определяют и

Параметр	Сталь отожженная	Керамика ЦМ 332	Твердый сплав Т15К6	Сталь Р18 закаленная и отпущенная	Сталь Р18 отожженная	Кубический нитрид бора	Твердый сплав ВК8	Природный алмаз
Твердость HV, кгс/мм²	171—228	2000—2300	1600—1700	804—868	208—255	8000—10000	1400—1500	8600—10000
Предел прочности, кгс/мм²:								
при растяжении*	60	18—23	⩾66	190—240	80—90	~18	⩾92	—
при изгибе	—	30—40	⩾110	300—340	92—96	~32	⩾160	~30
Модуль упругости $\times 10^{-4}$, кгс/мм²	2,04	4,0	5,2	2,2	2,2	7,2	5,9	7,2—9,3

* Определено расчетом из соотношения $\sigma_{вр} = 0{,}575\ \sigma_{и}$; для стали Р18, 45 — фактические данные.

3. Технологическая совместимость материалов

Соединяемые материалы		Характеристика сочетания	Технологическая совместимость	Способ соединения			
Металл корпуса инструмента	Материал режущего элемента — рабочей части инструмента			Сварка плавлением	Сварка контактная стыковая и трением	Пайка	Склеивание
Конструкционная или инструментальная сталь	Быстрорежущая сталь	Однородное, разноименное	Удовлетворительная	Ог	О	Д	Д
	Металлокерамический твердый сплав	Разнородное	Слабая	Н	Н	О	Д
	Неметаллические материалы (минералокерамика, керметы, синтетические особо твердые материалы)	Инородное	Ограниченная	Н	Н	Ог	Ог

Примечание. Характеристика способа соединения: О — основной; Д — дополнительный; Ог — ограниченного применения; Н — не применяется.

4. Конструктивно-технологические меры при получении неразъемных соединений инструментальных материалов со сталью

Причины появления временных и остаточных напряжений	Конструктивно-технологические меры для повышения технологической и эксплуатационной прочности соединения	Применение
Быстрорежущая сталь в отожженном состоянии		
При контактной стыковой сварке оплавлением и сварке трением неодновременное превращение аустенита в мартенсит в зоне термического влияния (участки, нагретые до меньшей температуры, имеют раннее превращение) Химическая и структурно-фазовая неоднородность околошовной зоны быстрорежущей стали после сварки и после отжига	Заготовки после сварки помещают в печь или приемник для отжига или медленного охлаждения с целью устранения условий образования мартенсита в зоне термического влияния	Сварка концевого инструмента
При пайке припоем с температурой плавления, близкой к температуре нагрева для закалки, с последующими отжигом инструмента и закалкой или при пайке в сочетании с закалкой (в соляных ваннах) быстрорежущая сталь увеличивается в объеме; стальной корпус инструмента при этом не закаливается и изменений в объеме нет	Закалка инструмента без погружения шва в зону нагрева; закалка в соль с температурой 600—650°С; замена стали 45 (40Х) корпуса инструмента сталью, легированной карбидообразующими элементами, например марок 35ХГС, 50ХФА Уменьшение площади паяного соединения. Применение для корпуса инструмента стали, закаливающейся при режиме, принятом для закалки быстрорежущей стали. Пайка режущих элементов из быстрорежущей стали, предварительно термически обработанных (закалка и отпуск), при температуре, равной или несколько выше температуры отпуска быстрорежущей стали	Пайка концевого и насадного инструмента
Твердый сплав		
При пайке: различные коэффициенты линейного расширения твердого сплава и стали незначительная пластичность и высокая твердость твердого сплава низкая термостойкость твердого сплава, особенно титано-вольфрамового и безвольфрамового механическая неоднородность соединения твердый сплав — сталь	Пайка припоем с температурой плавления не выше 1100 °С, с пластичностью, характеризующейся относительным удлинением 40—60% и пределом прочности при растяжении 20—30 кгс/мм² Закалка стали корпуса в процессе охлаждения после пайки Релаксационный отпуск инструмента после пайки Компенсационные прокладки в соединении Конструкцию и размеры паяного соединения определяют так, чтобы уменьшить связи пластинки с присоединительной частью инструмента (лучший вариант —	Инструмент, оснащенный пластинками из твердого сплава (однолезвийный, многолезвийный), инструмент концевой с рабочей частью из твердого сплава

остаточных напряжений	технологической и эксплуатационной прочности соединения	Применение
	Применение высокопрочных конструкционных сталей, воспринимающих закалку при охлаждении на воздухе инструмента после пайки Пайка припоем с температурой плавления 600—650 °С и закалка и отпуск стального корпуса инструмента перед пайкой на необходимую твердость	
Керамика, керметы, синтетические особо твердые материалы		
При пайке в условиях, делающих возможным смачивание поверхности инструментального материала, отсутствие пластичности, высокая твердость, низкая теплопроводность неметаллических инструментальных материалов	Металлизация поверхности изделия из инструментального материала Применение припоев, которые содержат элементы, вступающие в химические соединения с элементами инструментального материала	—

5. Способы сварки и пайки, применяемые при изготовлении инструментов

Способ получения неразъемных соединений	Краткая характеристика	Изготовляемый инструмент
Сварка давлением		
Контактная стыковая оплавлением	Предварительный подогрев замыканиями и размыканиями свариваемых торцов заготовок	Концевой (сверла, зенкеры, развертки, метчики, фрезы), резцы малых сечений и зуборезный инструмент (концевые долбяки, зуборезные гребенки и резцы). Экономия быстрорежущей стали 50—60%
Стыковая трением	—	Концевой цилиндрической формы. Экономия быстрорежущей стали 50—60%
Прессовая по методу А. М. Игнатьева	Пакет из двух или нескольких листов стали нагревается проходящим по нему током большой силы до температуры сварки и затем сдавливается (давление приложено перпендикулярно направлению тока)	Призматической формы, например тангенциальные призматические резцы. Экономия быстрорежущей стали до 80%

Продолжение табл. 5

Способ получения неразъемных соединений	Краткая характеристика	Изготовляемый инструмент
Контактная точечная	Нагрев сварочным током пластинки из быстрорежущей стали и головки инструмента (в открытый паз которой уложена пластинка) до температуры сварки и последующая осадка. В паз пластинки предварительно насыпают порошковый припой с температурой плавления в интервале температур нагрева под закалку быстрорежущей стали. Может быть применена порошковая смесь припоя с флюсом с температурой плавления, близкой к температуре нагрева под закалку быстрорежущей стали. Производят на точечных машинах	Резцы, оснащенные пластинками из быстрорежущей стали
Сварка плавлением		
Дуговая металлическим электродом со специальным покрытием	Наплавка режущих кромок инструмента быстрорежущей сталью или сплавом. Электроды применяют со стержнем из быстрорежущей стали или со стержнем из низкоуглеродистой или легированной стали с легирующим покрытием, обеспечивающим получение наплавленного слоя быстрорежущей стали заданного химического состава	Многолезвийный инструмент, например концевые и цилиндрические фрезы, отрезные резцы и др. Экономия быстрорежущей стали до 85%
	Приварка к корпусу инструмента пластин или пожей из быстрорежущей стали. Используют электроды из аустенитной хромоникелевой стали	Многолезвийный инструмент. Экономия быстрорежущей стали до 70%
Пайка		
В очковых пламенных печах *)	Прикрепление пластинок из твердого сплава или из быстрорежущей стали к корпусу инструмента с использованием припоев, особенно порошковых	Резцы различных типов
В печах с электрическим нагревом и восстановительной газовой средой	Прикрепление пластинок из твердого сплава к корпусу инструмента с нагревом в восстановительной газовой среде	Многолезвийный насадной инструмент, например фрезы, вставные ножи к сборному инструменту, резцы малых размеров
Контактная с косвенным	Прикрепление пластинки из твердого сплава к кор-	Резцы и вставные ножи к сборному мно-

Продолжение табл. 5

Способ получения неразъемных соединений	Краткая характеристика	Изготовляемый инструмент
Индукционная	Прикрепление пластинок и полосок из твердого сплава и из быстрорежущей стали к корпусу инструмента; прикрепление стержней из твердого сплава и из быстрорежущей стали к присоединительной части; прикрепление рабочей части из твердого сплава и из быстрорежущей стали к присоединительной части из твердого сплава и из быстрорежущей стали в виде диска, втулки, венца к присоединительной части инструмента. Индукционный нагрев от ламового или машинного генератора токов высокой частоты	Широкой номенклатуры, оснащенный твердым сплавом и быстрорежущей сталью
Погружением в расплавленный припой	Прикрепление пластинок и режущей части инструментов в виде диска, втулки, венца из твердого сплава и из быстрорежущей стали к корпусу инструмента	С пластинками из твердого сплава и быстрорежущей стали, вставленными в закрытые пазы корпуса (зенкеры, развертки, сверла); с режущей частью из быстрорежущей стали и твердого сплава
Погружением в расплавленную соль	Прикрепление пластинок и режущей части инструмента в виде диска, втулки, венца из твердого сплава или из быстрорежущей стали к корпусу инструмента. В случае пайки инструмента с пластинками из быстрорежущей стали и из твердого сплава в виде диска, венца, втулки, стержня, соединенные с корпусом и присоединительной частью инструмента одновременно с закалкой быстрорежущей стали	С пластинками и полосками из твердого сплава и из быстрорежущей стали, вставленными в закрытые пазы корпуса инструмента; с режущей, частью из быстрорежущей стали и из твердого сплава в виде диска, венца, втулки, стержня, соединенные с корпусом и присоединительной частью инструмента
Газопламенная, с ацетилено-кислородным пламенем *)	Нагрев корпуса инструмента и пластинок из твердого сплава	Резцы малых размеров и многолезвийный инструмент

* Применяют ограниченно.

Примечание. Инструмент паяной конструкции с пластинками из твердого сплава и из быстрорежущей стали обеспечивает экономию быторежущей стали 50—90%.

эксплуатационные характеристики инструмента. Теплофизические свойства быстрорежущих сталей следует рассматривать в отожженном состоянии и после закалки и отпуска. Теплопроводность отожженной быстрорежущей стали при 20° С примерно в 2 раза меньше теплопроводности конструкционной стали, а в закаленном состоянии — в 3 раза меньше. На теплопроводность быстрорежущей стали влияет ее химический состав: молибден и кобальт повышают теплопроводность, вольфрам и ванадий — снижают. Теплопроводность определяет зону термического влияния при сварке. Теплопроводность влияет на скорость нагрева до температуры пайки при индукционном нагреве (чем выше теплопроводность, тем больше допустимая скорость нагрева) и определяет температуру соединения при эксплуатации инструмента. Теплоемкость влияет на коэффициент теплового насыщения материала: чем меньше теплоемкость, тем быстрее при прочих равных условиях происходит нагрев металла.

Механические свойства твердых сплавов, минералокерамики и быстрорежущей стали также очень различны (табл. 2). Технологическая совместимость инструментальных материалов при получении неразъемных соединений со сталью представлена в табл. 3.

Инструментальные материалы, имея особые свойства, определяемые служебным назначением, имеют или ограниченную технологическую совместимость, поскольку являются неметаллическими, или слабую технологическую совместимость, поскольку металлоподобный материал, соединенный пайкой, образует разнородное соединение, а в диффузионную связь вступает только металлическая связка этого материала; удовлетворительная совместимость достигается при соединении быстрорежущей стали с конструкционной сталью, сопровождающемся большими остаточными напряжениями из-за структурного превращения $\gamma \rightarrow \alpha$. Поэтому при получении неразъемных соединений инструментальных материалов со сталью необходимо применять определенные конструктивно-технологические меры (табл. 4.)

Инструмент, однолезвийный и многолезвийный, оснащенный пластинками из быстрорежущей стали (аналогично инструменту с пластинками из твердого сплава), паяный припоем с температурой плавления, равной или несколько выше температуры отпуска быстрорежущей стали (600—650° С), наиболее технологичен и экономичен. Для повышения эксплуатационной прочности соединения следует применять закалку стальной присоединительной части инструмента до пайки (особенно эффективна для инструмента, тяжело нагруженного при эксплуатации). Концевой инструмент с рабочей и присоединительной частями, предварительно закаленными и отпущенными, следует соединять высокопрочным припоем. При этом технологические напряжения в соединении не возникают, а механическая неоднородность соединения, способствующая концентрации напряжения, также отсутствует.

Способы получения неразъемного соединения рабочей части инструмента с присоединительной и режущих элементов рабочей части инструмента с его корпусом приведены в табл. 5.

ТЕХНОЛОГИЯ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ ОПЛАВЛЕНИЕМ И СВАРКИ ТРЕНИЕМ ЗАГОТОВОК ИНСТРУМЕНТА

Заготовки из быстрорежущей и конструкционной сталей под сварку должны иметь свариваемые торцы одинаковой формы и равной площади. Различают заготовки простые цилиндрической формы и стержневые ступенчатые, если диаметры рабочей и присоединительной частей не одинаковы. Данные, необходимые для определения размеров заготовок под сварку, приведены в табл. 6—8.

Свариваемые, контактные и зажимные поверхности заготовок должны быть очищены от загрязнений в галтовочных барабанах.

6. Припуск (мм) на диаметр при контактной стыковой сварке

Диаметр готового изделия, мм	Длина заготовки, мм, до								
	100	150	200	250	300	350	400	450	500
Рабочая часть заготовки									
6—14	1,40	1,45	1,60	1,70	1,90	2,15	2,40	2,70	3,00
14,25—31,5	1,60	1,65	1,80	1,95	2,10	2,35	2,60	2,90	3,20
31,75—50,5	2,00	2,05	2,20	2,35	2,50	2,75	3,00	3,30	3,60
51—70	2,20	2,25	2,40	2,55	2,70	2,95	3,20	3,50	3,80
72—80	2,60	2,65	2,80	2,95	3,10	3,35	3,60	3,80	4,30
Присоединительная часть заготовки									
6—14	1,60	1,65	1,80	1,90	2,10	2,35	2,60	2,90	3,20
14,25—23	1,85	1,90	2,05	2,15	2,35	2,60	2,85	3,15	3,45
23—50,5	2,00	2,05	2,20	2,30	2,50	2,75	3,00	3,30	3,60
51—60	2,45	2,50	2,65	2,75	2,95	3,20	3,45	3,75	4,05
61—80	2,7	2,75	2,90	3,0	3,20	3,45	3,70	4,00	4,30

7. Допуски на заготовки и сборку свариваемого инструмента (для контактной стыковой сварки)

Диаметр готового изделия, мм	Смещение осей заготовки, мм	Отклонение от перпендикулярности	
		Быстрорежущая сталь	Конструкционная сталь
6—14 14,25—31,5	0,40 0,42	0,6	0,5
31,75—36	0,50		
36,5—50,5		0,7	0,6
51—60	0,57	0,8	0,7
61—75 78—80	0,65 0,70	0,9	0,8

8. Минимально допустимые длины заготовки и шейки

Диаметр заготовки, мм	Минимальная длина заготовки, мм		Минимальная длина шейки на заготовке, мм	
	Быстрорежущая сталь	Конструкционная сталь	Быстрорежущая сталь	Конструкционная сталь
8—10 10,1—12,5 12,6—16	32	40	10 11 12	10 12 15
16,1—20 20,1—25	40	52	15	18
25,1—32	45	60	18	
32,1—40	47		20	22
40,1—50	55	70		
50,1—63	70	88	22	25
63,1—80	77	100	26	30

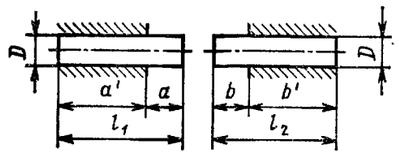
Стыковую контактную сварку оплавлением заготовок инструмента производят с предварительным нагревом повторяющимися замыканиями и размыканиями торцов заготовок при включенном токе; подогрев является подготовительной стадией процесса. После определенного числа замыканий и размыканий температура нагрева торцов повышается до образования на их поверхности жидкой пленки металла и одновременно выравнивается; поверхности становятся подготовленными к следующей стадии процесса — оплавлению, а нагрев концов заготовок на определенное расстояние вглубь от торцов создает условия для осадки. Оплавление обеспечивает удаление перегретого и окисленного металла с поверхности торцов заготовок, а избыточное давление паров металла в зазоре между торцами стержней защищает их от окисления, поэтому оплавление следует вести устойчиво, без перерыва. Режимы сварки приведены в табл. 10.

9. Режимы стыковой контактной сварки быстрорежущих сталей со сталью 45

Диаметр заготовки, мм	Припуск, мм								Усилие осадки, кгс			Потребляемая мощность, кВ·А		Установочная длина, мм, для заготовок	
	на подогрев			на оплавление			общий							из быстрорежущей стали	из стали 45 при сварке с быстрорежущей сталью
	I	II	III	I	II	III	I	II	I	II	III	I	II, III	I, III	II	I, III	II
8—10	1,0	—	1,6	2,1	2,2	1,6	5,4	4,4	5,8	250	380	320	7	9	10	10	15	15
10,1—12,5	1,1	—	1,7	2,3	2,4	1,7	5,7	4,6	6,0	380	570	475	10	12	10	10	15	15
12,6—16	1,2	—	1,8	2,4	2,5	1,8	6,0	4,8	6,4	600	900	750	15	17	10	12	15	18
16,5—20	1,3	1,2	1,9	2,5	2,7	1,9	6,4	6,0	6,8	980	1 470	1 180	25	30	12	16	18	24
20,5—25	1,4	1,3	2,1	2,7	2,9	2,1	6,8	6,5	7,3	1 470	2 200	1 840	35	40	16	20	24	24
25,5—32	1,5	1,4	2,2	3,0	3,1	2,2	7,4	7,1	7,8	2 280	3 420	2 850	50	60	19	24	28	28
33—40	1,7	1,5	2,4	3,3	3,5	2,4	8,2	7,8	8,6	3 560	5 350	3 450	60	70	24	32	36	36
41—51	2,0	1,7	2,7	3,6	3,9	2,7	9,2	8,8	9,7	5 420	8 100	6 750	100	110	28	38	42	42
52—63	2,3	2,0	3,0	4,0	4,3	3,0	10,4	10,0	10,8	7 850	11 700	9 800	120	140	34	45	51	51
65—80	2,8	2,3	3,5	4,5	5,0	3,5	12,0	11,6	12,4	12 000	18 000	15 000	130	150	36	50	54	54

Примечания: 1. К группе I относятся стали Р9, Р12, Р18, Р9К5; к группе II — стали Р6М5К5, Р9М4К8, Р9Ф5, Р9К10,Р10К5Ф5, Р14Ф4, Р18Ф2. 2,5—1,0 мм/с для сталей II группы; 2,0—0,8 мм/с для сталей III группы; с увеличением диаметра заготовок скорость оплавления уменьшается. 2. Скорость оплавления: 2,2—0,8 мм/с для сталей I группы; 2,5—1,0 мм. 3. Скорость осадки 15—10 мм/с. Припуск на осадку равен разности между общим припуском и припуском на подогрев и оплавление. Начало осадки происходит при включенном сварочном токе. Ток выключают, когда осадка произведена на 0,5—1,0 мм. 4. Припуск на быстрорежущую сталь равен $\eta\Delta_{общ}$; $\eta = 0{,}7$ мм для сталей II группы; $\eta = 0{,}72 \div 0{,}83$ мм для сталей III группы; $\eta = 0{,}6$ мм для сталей I группы.

10. Технологическая карта стыковой сварки заготовок инструмента из быстрорежущих сталей Р9 и Р18 с конструкционными сталями 45 и 40Х

Технические требования	
	1. Если длина рабочей части заготовки меньше требуемой по условиям сварки, следует брать заготовку рабочей части (из быстрорежущей стали) двойной длины с учетом приварки с двух сторон хвостовой части и последующей разрезки сварной заготовки на две части. 2. Поверхность свариваемого торца должна быть перпендикулярной к продольной оси заготовки. Максимальное отклонение от перпендикулярности в зависимости от диаметра заготовок указано в табл. 7. 3. При сварке цилиндрических заготовок различных диаметров на большей заготовке должна быть сделана шейка диаметром, равным диаметру меньшей заготовки. Длина шейки зависит от диаметра заготовки (см. табл. 8).

Диаметр заготовки, мм			Минимальная длина заготовки до сварки, мм		Длина заготовки после сварки, мм		Припуск на сварку, мм, для стали				Вылет концов из зажимов, мм		Минимальная длина зажима, мм		Напряжение на губках машины, В	Плотность тока, А/мм²		Требуемая мощность, кВ·А	Усилие осадки кгс/мм²	Усилие зажатия, кгс	Время сварки, с	
D	Допуск для стали		l_1	l_2	L	Допуск	быстрорежущей	конструкционной	Общий	Допуск	a	b	a'	b'		Подогрев	Оплавление				$t_{св}$	$t_{всп}$
	быстрорежущей	конструкционной																				
8—12	+0,5	+0,3 −0,5	32	40	66,5		3,5	2,0	5,5		10	15	22	25	3,8—4,0	40—30	12,5—10	10		175—200	5	25
13—15	+0,6	+0,3 −0,5	32	40	65,5	±1,0	4,0	2,5	6,5	−0,5	10	15	22	25	3,8—4,0	40—30	12,5—8,0	15	3,5—4,0	340—390	7	24
16—25	+0,7	+0,4 −0,5	40	52	85,5		4,0	2,5	6,5		16	24	24	28	4,0—4,5	30—20	10—7,5	30		550—630	12	24
26—34	+0,9	+0,4 −0,7	47	60	100		4,5	2,5	7,0		19	28	28	32	4,5—5,0	20—15	7,5—4,5	50		1220—1400	19	21
35—39	+1,2	+0,4 −0,7	55	70	118	+1,5 −1,0	4,5	2,5	7,0	−1,0	24	36	31	34	5,0—5,5	20—15	7,5—4,5	65		1570—1830	24	21
40—50	+1,3	+0,4 −1,0	60	78	130		5,0	3,0	8,0		28	42	32	36	5,5—6,0	15—10	4,5—3,0	80	3—3,5	2400—2780	31	21
51—55	+1,6	+0,4 −1,0	70	88	148,5		6,0	3,5	9,5		32	48	33	40	6,5—7,0	10—8	3,0—2,6	90		3200—4700	37	23
56—60	+1,6	+0,5 −1,0	72	95	157		6,5	3,5	10,0		34	51	38	44	6,5—7,0	10—8	3,0—2,6	100		3300—3960	48	24
61—65	+1,6	+0,5 −1,1	75	100	164		7,0	4,0	11,0		34	51	41	49	7,0—7,5	8—6,5	2,6—2,4	110		4500—5400	64	28
66—75	+1,8	+0,5 −1,1	77	106	171	+2,5 −1,0	7,5	4,5	12,0	−2,0	36	54	41	52	7,0—7,5	8—6,5	2,6—2,4	130	2,5—3,0	4800—5750	72	38
76—80	+2,0	+0,5 −1,3	80	110	178		7,5	4,5	12,0		38	57	42	53	7,5—8,0	6,5—6	2,4—2,3	140		6000—7000	77	58
81—85	+2,0	+0,5 −1,3	82	115	185		7,5	4,5	12,0		40	60	42	55	7,5—8,0	6,5—6	2,4—2,3	150		6600—7300	96	74

Примечание. Скорость оплавления 1,5—1,8 мм/с, осадки 10—15 мм/с.

Быстрорежущие стали различных групп различаются по химическому составу и физико-механическим свойствам, поэтому режимы их сварки различны (табл. 9). Вольфрамомолибденовые быстрорежущие стали (группа II) по сравнению со сталями других групп имеют бо́льшую теплопроводность, повышенную пластичность и меньшее сопротивление пластической деформации. Стали этой группы сваривают с меньшими припусками и с бо́льшим усилием осадки. Для заготовок диаметром до 16 мм из стали этой группы возможна сварка непрерывным оплавлением или с несколькими кратковременными замыканиями.

Прочность сварного соединения во многом зависит от усилия и величины осадки. Осадка составляет 1,6—3,0 мм. Усилие осадки зависит от сопротивления металла деформации, скорости осадки и глубины прогрева свариваемых концов заготовок. При скорости осадки 10—15 мм/с качественное соединение получается при давлении осадки 4—6 кгс/мм². Чтобы оплавление перед осадкой не прерывалось, а также для некоторого облегчения пластической деформации при осадке, сварочный ток выключается (автоматически), когда осадка произведена на 0,5—1 мм.

Свариваемость быстрорежущих сталей изменяется в широких пределах в зависимости от химического и структурно-фазового состава стали (в отожженном состоянии). Примем свариваемость стали Р12 за единицу; для других сталей сравнительная свариваемость при контактной стыковой сварке оплавлением будет следующей:

Марки стали . . .	Р12	Р6М5	Р18	Р9К5	Р14Ф4	Р6М5К5	Р9М4К8	Р9Ф5
Сравнительная свариваемость . .	1	0,93	0,86	0,8	0,79	0,76	0,72	0,60

Основные дефекты сварных соединений приведены в табл. 11.

Технология сварки трением заготовок инструмента. При сварке трением: припуск на сварку быстрорежущей стали в 2 раза меньше, чем при контактной сварке оплавлением, меньшее потребление энергии, бо́льшая точность свариваемых заготовок, более легко автоматизируется процесс, отсутствует перегрев быстрорежущей стали.

Для сварки используют специализированные машины МФ327 и МФ341 и универсальные машины МСТ-23, МСТ-35, МСТ-41. На режим сварки трением влияют физико-механические свойства стали; стали вольфрамомолибденовые с повышенной теплопроводностью, высокой пластичностью и низким сопротивлением пластической деформации по сравнению со сталями других групп сваривают на режиме, отличающемся низким давлением нагрева и проковки и примерно в 1,5 раза увеличенным временем нагрева; стали вольфрамокобальтовые и вольфрамомолибденокобальтовые нужно сваривать, применяя повышенные давления (табл. 12); обратная зависимость наблюдается в назначении припуска на сварку (табл. 13).

В процессе нагрева при сварке трением заготовок из быстрорежущей и конструкционной сталей в контакте образуется промежуточный слой, присутствие которого в стыке снижает прочность соединения. Промежуточный слой выдавливается при проковке и в стадии нагрева; эта стадия характеризуется относительно низким и стабильным моментом. Инструмент с присоединительной частью из стали 45 (40Х), сваренный трением, плохо воспринимает закалку при нагреве рабочей части вместе со сварным швом.

Режимы сварки, приведенные в табл. 12, обеспечивают получение качественного соединения при изменении давления в воздушной сети, к которой присоединена машина сварки трением, не более 15%. Особенно чувствительны к изменению давления быстрорежущие стали вольфрамокобальтовой, вольфрамомолибденовой и вольфрамомолибденокобальтовой групп. Рекомендуемые режимы сварки требуют выполнения следующих технологических условий: 1) вылет стержня из конструкционной стали из осадочной матрицы 2—2,5 мм; 2) размер формирующей фаски осадочной матрицы 2 × 30°; 3) скорость течения воды, охлаждающей матрицы, 2,0—2,5 л/мин; 4) давление воздуха в сети 4,5—5 кгс/см².

При сварке трением по степени ухудшения свариваемости стали располагаются в следующий ряд: Р6М5, Р12, Р18, Р9М4К8, Р9К5, Р14Ф4, Р9Ф5. При общей тенденции ухудшения свариваемости с увеличением суммарного количества легирующих элементов расположение сталей в порядке ухудшения свариваемости для контактной стыковой сварки оплавлением и сварки трением не идентично. Например, вольфрамомолибденовые и вольфрамомолибденокобальтовые стали трением свариваются лучше, чем контактной стыковой сваркой оплавлением. Плохо свариваются трением вольфрамованадиевые стали.

11. Основные дефекты сварных соединений при контактной сварке оплавлением и сварке трением

Дефект	Признаки	Причины
Контактная сварка оплавлением		
Смещение осей заготовок за пределы допусков	Смещение сваренных торцов	Исходные заготовки с повышенной кривизной. Недопустимый износ рабочих контактных поверхностей зажимных губок стыковой машины. Неправильная установка зажимных губок, слабое их крепление. Большой зазор подвижного стола стыковой машины. Недостаточная жесткость станины, столов, зажимов и упоров машины
Несоответствие формы заготовки требуемой	Изменение формы	Неправильная наладка машины, отсутствие упоров. Отклонение от установленных припусков на сварку. Остальные причины те же, что и при смещении осей
Непровар, раковины	Малый грат в соединении, «раздвоение» его	Недостаточный подогрев, повышенный припуск на оплавление; мало давление осадки. Недостаточная осадка под током. Выключение тока перед началом осадки
Перегрев, пережог	Крупный грат. Большая зона нагрева	Завышен сварочный ток. Завышено время подогрева. Велика осадка под током, мал припуск на оплавление
Подгар боковых поверхностей	Раковины и трещины в местах подгара	Мала сила зажатия; сварка без упоров; малая рабочая контактная поверхность токоподводящих губок. Загрязненная поверхность заготовок или губок. Плохое охлаждение губок. Износ и деформация губок. Несоответствие формы заготовок и губок
Трещины	В изломе на поверхность выходит замкнутое или незамкнутое кольцо	Охлаждение заготовки после сварки на воздухе. Быстрое освобождение заготовки из зажимов (должна быть выдержка 1—3 с)
Сварка трением		
Непровары	В изломе блестящие концентрично расположенные кольца	Нарушение технологии: мало время нагрева; мало давление осадки; значительное отклонение давления воздуха в сети от номинального; отклонение длины заготовки от номинальной, на которую настроен вылет из осадочной матрицы. Износ осадочной матрицы и цанги. Окисленные (покрытые ржавчиной) торцы стержней
Смещение осей заготовок более чем на 0,5 мм	Смещение торцов	Изношены направляющие машины. Недостаточная жесткость машины. Износ цанги

12. Режимы сварки трением быстрорежущих сталей со сталью 45 (40Х)

Диаметр заготовки, мм	Р6М5			Р18			Р9М4К8		
	$p_н$	$p_п$	t, с	$p_н$	$p_п$	t, с	$p_н$	$p_п$	
	кгс/мм²			кгс/мм²			кгс/мм²		
10	21—23	30—46	4,5—5,5	—	—	—	29—30	60—65	
12	15,5—16,5	20—32	7—8	17—20	30—40	5—7	—	—	
14	12—13	15—26	9—10	—	20—30	—	—	—	
15	—	—	—	10—15	—	9—11	14,5—15	20—25	
16	9—10	12—20	15—17	10—11	15—20	10—12	13—13,5	20—20,5	
18	7—8	10—16	15,5—16,5	7,5—8	12—15	13—14	10—11	15—20	
20	6—7	8—14	18,5—19,5	6—6,5	10—15	15—17	—	—	
22	5—6	6—12	22—24	5,5—6	8—13	19—21	7—7,2	10—15	
25	13—14	15—25	25—27	13—14	30—40	18—19	16—16,5	30—35	
28	—	—	—	—	—	—	13—13,5	25—30	
30	9—11	12—20	33—35	—	—	—	11—12	20—25	
32	8—10	10—15	36—38	8—10	15—20	22,5—24	—	—	
35	6,5—7,5	10—15	37—39	7,5—8,5	15—20	24,5—26	8—9	16—20	
40	5—6	8—12	44—46	6—7	15—18	31—35	6—7	10—15	

Примечание. Время осадки 3—3,5 с; принятые условные обозначения:

	Р9К5, Р9К10			Р14Ф4			Оборудование
t, с	$p_н$	$p_п$	t, с	$p_н$	$p_п$	t, с	
	кгс/мм²			кгс/мм²			
3,5—4,5	30—31	60	2,8—3,2	30—32	62—65	1,5—2	МФ-327, МСТ-23 (n = 1500 об/мин)
6—8	22—23	44	4,5—5,0	22,5—23,5	45—50	3—4	
—	—	—	—	18—18,5	32—35	6—6,5	
8,5—9,5	—	—	—	—	—	—	
10—10,5	14—14,5	25	9—10	14—15	25—30	8—9	
13—13,5	11—11,5	20	14—14,5	11—13	20—25	10—10,5	
—	—	—	—	9—10,5	15—17	13—14	
18—18,5	7,5—8	15	16,5—17	8—8,5	13—15	15—16	
19—20	—	—	—	17—19	35—40	15—16	МСТ-35, МСТ-41 (n = 750 ÷ ÷ 1000 об/мин)
22—24	13—14	28	21—22	14,5—15,5	30—32	18—20	
24—25	10—10,5	25	23,5—24	—	—	—	
—	—	—	—	12—13,5	25—27	23—24	
29—30	8—9	20	28—29	8—10	20—21	26—28	
32—33	6,5—6,7	15	30—31	6,5—7,5	15—16	30—31	

$p_н$ — давление нагрева; $p_п$ — давление проковки; t — время нагрева.

13. Припуск на сварку для заготовок инструмента с рабочей частью из быстрорежущей стали и присоединительной частью из стали 45 (40Х), сваренных трением по режимам и на оборудовании, приведенным в табл. 12

Сталь	Припуск (мм) в зависимости от диаметра заготовки, мм							
	10	12	14	15	16	18	20	22
Р6М5	5—5,5 / 2—2,6	5,0—5,3 / 2,4—2,5	4,8—5,2 / 2,2—2,4	— / —	4,8—5,0 / 2,2—2,3	4,5—4,7 / 2,0—2,2	4,4—4,6 / 2,0—2,1	4,0—4,5 / 1,8—2,0
Р18	— / —	4,0—5,5 / 2—2,7	— / —	4,5 / 2—2,5	4,3—4,5 / 1,8—2,0	3,8—4,5 / 1,6—1,8	3,8—4,0 / 1,5—1,6	3,4—3,6 / 1,4—1,5
Р9М4К8	4,1—4,4 / 1,6—1,8	— / —	— / —	3,9—4,0 / 1,5—1,7	3,9—4,0 / 1,5—1,6	3,7—3,8 / 1,4—1,6	— / —	3,56—3,6 / 1,3—1,4
Р9К5, Р9К10	4,0—4,1 / 1,6—1,65	4,0—4,2 / 1,5—1,6	— / —	— / —	3,5—3,8 / 1,4—1,5	3,5—3,6 / 1,3—1,4	— / —	3,2—3,6 / 1,2—1,3
Р14Ф4	3,5—4,0 / 1,0—1,5	3,5—3,8 / 1,0—1,35	3,6—3,7 / 1,2—1,3	— / —	3,5—3,7 / 1,2—1,3	3,4—3,5 / 1,2—1,3	3,3—3,5 / 1,2—1,25	3,3—3,5 / 1,1—1,2

Сталь	Припуск (мм) в зависимости от диаметра заготовки, мм							
	25	28	30	32	35	40		
Р6М5	4,2—4,4 / 1,5—1,6	— / —	3,9—4,1 / 1,4—1,5	3,7—4,0 / 1,5—1,6	3,5—3,6 / 1,3—1,5	3,2—3,4 / 1,0—1,5		
Р18	4,0—5,4 / 1,3—1,4	— / —	— / —	3,3—4,0 / 1,1—1,3	3,0—3,7 / 1,0—1,2	2,8—3,5 / 0,8—1,1		
Р9М4К8	3,7—3,9 / 1,4—1,3	3,7—3,75 / 1,3—1,35	3,5—3,6 / 1,2—1,3	— / —	3,2—3,3 / 1,0—1,1	3,0—3,1 / 1,0—1,1		
Р9К5, Р9К10	— / —	3,5—3,55 / 1,2—1,25	3,3—3,4 / 1,1—1,2	— / —	2,8—3,2 / 1,1—1,2	2,8—3,0 / 1,0—1,1		
Р14Ф4	3,0—3,5 / 1,0—1,2	3,1—3,2 / 1,0—1,2	— / —	3,0—3,2 / 0,9—1,0	3,0—3,1 / 0,9—1,0	2,8—3,0 / 0,8—1,0		

Примечание. В числителе указан припуск общий, а в знаменателе — для быстрорежущей стали.

ТЕХНОЛОГИЯ ПАЙКИ ЗАГОТОВОК ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА

Пайка — основной способ получения соединения пластин из твердого сплава с корпусом инструмента. В инструментальном производстве наиболее распространена пайка с индукционным нагревом. Она ведется в открытых петлевых индукторах, позволяющих регулировать скорость и равномерность нагрева, поправлять положение пластины в гнезде корпуса инструмента, вносить флюс и припой. В начале пайки нагрев корпуса инструмента должен опережать нагрев пластинки из твердого сплава. Пластинки из твердого сплава перед пайкой подвергают очистке галтовкой, дробеструйной обработкой, шлифованием.

Характеристика флюсов и припоев, применяющихся при пайке твердого сплава, приведена в табл. 14 и 15, общая характеристика паяемости твердых сплавов — в табл. 16. Остаточные напряжения в спае и твердом сплаве, возникающие после пайки из-за различных коэффициентов теплового линейного расширения твердого сплава и стали, снижаются:

1) при закалке корпуса инструмента после пайки;

2) при релаксационном отпуске после пайки при 220—240° С с выдержкой 4—8 ч;

3) при применении компенсационных прокладок из пермаллоя.

14. Состав флюсов для пайки инструментальных материалов [3, 5]

Марка	Содержание, % по массе	Температурный интервал активности, °С	Назначение
ВНИИ* (200)	69—73 плавленой буры, 18—22 плавленого борного ангидрида, 8—10 фтористого кальция	850—1150	Пайка твердого сплава вольфрамовой группы
Ф100 (ТУ 48-02-48—70)	32—36 обезвоженной буры, 14—16 окиси вольфрама, 2—3 окиси кобальта, остальное фторборат калия	900—1050	Пайка твердого сплава вольфрамотитановой группы и быстрорежущей стали высокотемпературным припоем
Ф100А	8—10 борного ангидрида, 8—10 фтористого натрия, 8—10 окиси вольфрама, 3—5 вольфрамата кобальта, 0,5—1 окиси кобальта, остальное бура обезвоженная	900—1050	То же
209	33—37 фтористого калия (обезвоженного), 21—25 фторбората калия, 33—37 борного ангидрида	600—850	Пайка твердого сплава и быстрорежущей стали серебросодержащим припоем
Ф70 (ВНИИ)	0,5—1,5 гидрата окиси лития, 10—12 обезвоженного борного ангидрида, 14—16 фтористого калия, остальное фторборат калия	500—850	То же
284 (ТУ 48-02-62—61)	33—37 фтористого калия, 40—44 фторбората калия, 23—25 борного ангидрида	500—850	»

* Флюс ВНИИ получают сплавлением компонентов смеси при 850—900° С до полного прекращения выделения пузырьков пара.

Закалка может быть частичной, без погружения пластинки из твердого сплава в охлаждающую среду (для резцов, вставных ножей к сварному инструменту), или полной, с погружением рабочей части инструмента в охлаждающую среду.

Для частичной закалки охлаждающей средой служит подогретая до 60—80° С вода; для полной закалки — подогретое масло или расплавленные соли (50% KNO_3 и 50% $NaNO_3$) с температурой 230—260° С в зависимости от марки стали корпуса и марки твердого сплава. Для изготовления корпуса режущего инструмента, оснащаемого твердым сплавом, применяют стали 45, 40Х, 9ХС, 35ХГСА. Наиболее целесообразно применять для корпусов инструмента сталь 35ХГСА, получающую твердость *HRC* 30—40 при нагреве для пайки до температуры выше 850° и последующем охлаждении на воздухе.

Эффективным способом снижения остаточных напряжений является закалка корпуса инструмента, проводимая в процессе его охлаждения после пайки. Поскольку возникающие структуры при закалке имеют больший объем по сравнению со структурами, образующимися при медленном охлаждении, объем корпуса увеличивается и в паяном соединении снимаются напряжения. Закалка корпуса инструмента, повышающая его прочность и твердость, повышает также и эксплуатационные свойства инструмента. Если под пластинкой из твердого сплава находится мягкая опора, то при повышенных нагрузках в процессе резания она может сминаться, что вызовет скол пластинки из твердого сплава. Чаще это наблюдается у отрезных, канавочных и тяжело нагруженных резцов с незакаленным корпусом. Если применяют припои с температурой пайки ниже температуры аустенизации, например марки ПСр40, то корпус закаливают до пайки на твердость *HRC* 40—50; в результате нагрева для пайки появляется отпущенная зона твердостью *HRC* 25—30 в зависимости от марки стали корпуса.

Для уменьшения остаточных напряжений при конструировании твердосплавного паяного инструмента необходимо выполнять определенные требования.

1. Отношение толщины пластинки из твердого сплава к толщине стальной части корпуса инструмента под пластинкой должно быть равно 1/3. Это отношение определяется отношением модулей упругости стали и твердого сплава.

15. Химический состав и температура плавления припоев, применяемых для пайки твердых сплавов [5]

Марка припоя и его назначение	Химический состав, %				Содержание других элементов, %	Температура плавления, °С	ГОСТ, ТУ
	Cu	Zn	Ni	Mn			
АНМц 0,6—4—2*1	Остальное	—	3—4	1,5—2,5	0,4—0,6 Al, до 0,2 Si	1020—1050	ТУ 48-21-87—72 (слитки)
МНМц 68—4—2*2	62—68	Остальное	4—5	1,5—2	До 0,3 Si	950—980	ТУ 48-08-476—71 (лента)
Медь МО*3	99,95	—	—	—	Примесей не более 0,05	1083	ГОСТ 859—66
Латунь Л68*4	67—70	Остальное	—	—	—	900—905	ГОСТ 15527—70
ПСр40*5	16,7±0,7	17±0,8	0,3±0,2	—	40±1 Ag, остальное — кадмий	595—605	ГОСТ 19738—74
ПСрМцН49*5	16	23	4,5	7,5	49 Ag	705	—

*1 Для пайки инструмента, работающего в тяжелых условиях.

*2 Для пайки инструмента, работающего в обычных условиях.

*3 Не рекомендуется для пайки инструмента, так как при 400—600° С имеет пониженную прочность.

*4 То же, допускается для пайки малонагруженного инструмента, например разверток.

*5 Для пайки твердых сплавов, особенно чувствительных к трещинообразованию (Т15К6, Т30К4 и др.), и ответственного инструмента, когда нельзя применять закалку корпуса с нагрева для пайки.

16. Паяемость твердых сплавов (при использовании инструментального припоя МНМц 68—4—2 и АНМц 0,6—4—2 и флюса, содержащего 60% буры, 30% борной кислоты, 10% фтористого кальция) [5]

Группа твердого сплава	Марка твердого сплава (ГОСТ 3882—74)	Склонность к трещинообразованию при охлаждении	Растекаемость припоя	Прочность спая на срез, кгс/мм²				Допускаемая скорость нагрева при пайке, °С/с	Условия охлаждения	Паяемость
				МНМц 68—4—2		АНМц 0,6—4—2				
				20° С	600° С	20° С	600° С			
Вольфрамовая с содержанием свыше 4% Со	ВК15 ВК10 ВК8 ВК8-В ВК6 ВК6-М ВК6-В	Трещиноустойчивые; пластинки толщиной до 7 мм, нагретые до 50° С и выше, охлаждают в воде при 20° С без трещинообразования	Хорошая	22—24	8—10	20—22	11—12	80—100	Замедленное; допускается закалка корпуса инструмента	Хорошая
Вольфрамовая с содержанием 2—4% Со	ВК3 ВК3-М ВК4 ВК4-В	Средней трещиноустойчивости; пластинки, нагретые до 350—550° С, охлаждают в воде при 20° С без трещинообразования; с уменьшением содержания кобальта трещиноустойчивость снижается	»	22—24	8—10	20—22	11—12	40—50	Рекомендуется закалка корпуса инструмента или замедленное охлаждение и отпуск	Удовлетворительная
Титановольфрамовые и титанотанталовольфрамовые	Т15К6 Т14К8 Т5К10 ТТ7К12 ТТ10К8-Б	Пониженная; для улучшения смачиваемости добавлять 50% флюса Ф100 во флюс, содержащий буру, борную кислоту и фтористый кальций	Пониженная; для улучшения смачиваемости добавлять 50% флюса Ф100 во флюс, содержащий буру, борную кислоту и фтористый кальций	18—20	7—8	19—20	9—10	40—50	Релаксационный отпуск, 220—240°, 4—6 ч	То же
Титановольфрамовая	Т30К4	Низкая	Ограниченная; для улучшения смачиваемости применять флюс Ф100	—	—	—	—	30—40	Релаксационный отпуск, 220—240° С, 6—8 ч	Ограниченная; сплав низкой трещиноустойчивости плохо смачивается припоем

2. Пластинка из твердого сплава должна быть соединена с корпусом по плоской поверхности пластинки и по заниженной вертикальной стенке, высота которой определяется необходимостью фиксирования правильного положения пластинки в гнезде; закрытых и полузакрытых пазов в корпусе инструмента под пластинки нужно избегать.

17. Средняя прочность на срез (кгс/мм²) паяных соединений твердого сплава со сталью 45 при регламентированных условиях пайки (толщина слоя припоя 0,1—0,15 мм; очистка пластинок из твердого сплава — галтовкой, после пайки релаксационный отпуск) [5]

Твердый сплав	Припой			
	Медь	Латунь Л63	МНМц 0,8—4—2	АНМц 0,6—4—2
ВК3	15,5	15	18	24
ВК8	16,5	17	25	26
Т5К10	15	15	20	20,5
Т15К6	13	14,5	17,5	19

3. Корпус паяного инструмента должен быть из легированной стали, например 35ХГСА, позволяющей получить после пайки твердость *HRC* 30—40 за счет закалки с температуры нагрева для пайки.

18. Средняя прочность на срез (кгс/мм²) паяных соединений твердого сплава со сталью в зависимости от условий пайки и марки стали; припой МНМц 68—4—2 [5]

Марка стали	Условия пайки		
	Охлаждение с релаксационным отпуском (220°, 8 ч)	Закалка стальной части образца с температуры нагрева при пайке (950—980° С)	Прокладка пермаллоя толщиной 0,2 мм, релаксационный отпуск
45	24	23	23,3
40Х	22,8	24,2	23,1
У7	22,4	24,8	23,4
9ХС	20	23,5	21,8
35ХГСА	19,7	25,6	22,4
18Х2Н4МА	20,5	26,0	23,8

Примечание. При охлаждении после пайки на воздухе средняя прочность на срез соединения твердого сплава со сталью 45 составляет 18 кгс/мм², а со сталью 40Х — 21 кгс/мм².

4. Длину пластинки из твердого сплава не рекомендуется назначать более трех- и четырехкратной ее высоты из-за увеличения касательных напряжений у краев спая, могущих вызвать появление трещин в твердом сплаве, параллельно спаю от края пластинки.

Прочность паяного соединения определяется свойствами соединяемых материалов и припоя, а также технологией пайки (табл. 17 и 18). Дефекты пайки даны в табл. 19.

19. Дефекты пайки и причины их появления

Дефект	Причины дефекта
Трещины в пластинках из твердого сплава	Остаточные напряжения, вызванные: неправильной технологией пайки; пониженной по сравнению с ГОСТ прочностью твердого сплава; неправильной конструкцией соединения; повышенными режимами затачивания и шлифования; дефекты на краях пластинок (сколы, выкрашивания), профиль режущей кромки на пластинке твердого сплава делается после пайки
Трещины в пластинках из твердого сплава, параллельные спаю	Высокая прочность, низкая пластичность припоя Большая протяженность паяного соединения
Непропай, газовые поры, включения шлака и флюса	Неправильная подготовка пластинок к пайке Применение флюса со слабой химической активностью Зазор между пластинкой из твердого сплава и стенкой корпуса более 0,15 мм; заусенцы в пазу корпуса, оставляемые после фрезерования Неравномерный нагрев твердого сплава и корпуса инструмента, вызванный применением несоответствующего индуктора и неправильным положением инструмента в нем Перегрев соединения, сопровождающийся выгоранием цинка из припоя
Смещение пластинок в пазу корпуса	Паз неправильной формы под пластинкой Отсутствие или слабое крепление пластинок перед пайкой Невнимательность паяльщика

ТЕХНОЛОГИЯ ПАЙКИ ЗАГОТОВОК БЫСТРОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Высокое качество режущего инструмента, имеющего рабочую часть или режущие элементы из быстрорежущей стали, соединенные пайкой с корпусом инструмента, достигается с помощью оптимальных условий и режимов термической обработки. Выполнить это условие можно, если использовать припои, имеющие температуру плавления, близкую к температуре нагрева для закалки применяемой быстрорежущей стали, что обеспечивает сохранение паяных соединений быстрорежущей и конструкционной сталей при термической обработке паяного инструмента. Для получения паяных соединений используют припои (или сварочные порошки), состав которых приведен в табл. 20.

Для пайки быстрорежущей стали применяют припой марки П110, формирующий соединение при 1160—1180° С и сохраняющий соединение при нагреве под закалку до 1300° С. Припой П110 жидкотекучий, поэтому в отличие от группы порошковых припоев (см. табл. 20) он не требует сильного прижима пластинки к опоре. При использовании высокотемпературных припоев инструменты изготовляют по технологической схеме пайка — отжиг — механическая и термическая обработка — финишные операции (шлифование, затачивание).

Технология термической обработки упрощается, если закалку с нагревом в соляных ваннах сочетать с пайкой. При этом устраняется отжиг инструмента. Еще более упрощается технология изготовления инструмента при оснащении его режущими элементами из быстрорежущей стали, предварительно закаленными и отпущенными. В этом случае инструмент изготовляют по технологической схеме механическая обработка — раздельная термическая обработка корпуса (присоединительной части) и режущих элементов — пайка — финишные операции. Нагрев для пайки мест соединения при этом не должен вызывать снижения красностойкости и твердости быстрорежущей стали — служебных свойств, полученных термической обработкой.

Быстрорежущие стали повышенной теплостойкости (например, Р9М4К8) имеют температуру кратковременного отпуска 620—630° С. При длительности нагрева для пайки 1—2 мин температура пайки может быть повышена до 620—640° С без снижения твердости и свойств термически обработанных сталей; для сталей нормальной теплостойкости, например Р6М5, нагрев в индукторе до 675° С в течение 90 с вызывает снижение твердости не более чем на полторы единицы *HRC* (табл. 21).

20. Химический состав и температура применения порошковых припоев для пайки пластинок из быстрорежущих сталей [4]

Состав припоя, %				Содержание в смеси, %		Температура применения порошкового припоя в смеси с флюсом, °С	Марка быстрорежущей стали, рекомендуемая при пайке
FeMn*	FeSi	Cu	стальной порошок	припоя	флюса **		
90—95	—	5—10	—	70	30	1280—1300	Р18
80—85	3—4	12—15	—	70	30	1200—1230	Р6М5
80—85	—	10—15	5—10	65—70	30—35	1200—1250	Р6М5
85—90	—	5—10	3—5	65—70	30—35	1280—1300	Р18

* Ферромарганец низкоуглеродистый 1,0—85% (ГОСТ 4755—70).
** Состав флюса: 70% плавленой буры, 30% борного ангидрида, 10% фтористого кальция.

21. Влияние температуры и длительности нагрева на твердость закаленных и отпущенных быстрорежущих сталей [5]

Марка стали	Условия нагрева	Твердость *HRC* при выдержке, с			
		10	30	60	90
Р9М4К8	Соляная ванна, 675° С	—	65,5	65,5	65,5
Р6М5	То же	—	64	64	63,5
Р9М4К8	В индукторе до температуры, °С:				
	700	66	63,5	63	—
Р6М5	700	63	62,5	62,5	—
Р9М4К8	650				65,5
	675				65,5
	700				64
	725	—	—	—	61,5
Р6М5	650				64,5
	675				63
	700				61

Поставленным условиям удовлетворяет припой ПСр40, имеющий температуру плавления 595—605° С, обеспечивающий получение прочности на срез соединения быстрорежущая сталь — сталь 45 (40Х) в пределах 20—25 кгс/мм² при 20° С и 8—10 кгс/мм² при 400° С.

Технология пайки термически обработанных пластинок из быстрорежущей стали близка к технологии пайки твердого сплава. Пластинки из быстрорежущей стали изготовляют соответствующей формы со скосами по передней и боковым поверхностям с припуском 1—2 мм на сторону для шлифования и заточки после пайки.

После термической обработки производят дробеструйную обработку пластин и шлифование опорных поверхностей. Зазор для пайки допускается в пределах 0,05—0,15 мм. Места пайки должны быть очищены от следов жира, грязи, окислов. Норма расхода припоя ПСр40 — 0,20 — 0,25 г/см² площади соединения. Включением и выключением тока в индукторе выдерживают припой в расплавленном состоянии 3—5 с, затем пластинку слегка поправляют и прижимают в пазу до затвердевания припоя. Инструмент после пайки охлаждают на воздухе. Остаточные напряжения в соединении отсутствуют, поскольку коэффициенты теплового расширения конструкционной и быстрорежущей сталей близки по значениям. Корпус инструмента термически обрабатывают до пайки на твердость *HRC* 40—50. По такой технологии следует изготовлять резцы, зенкеры, зенковки, насадные фрезы с крупным шагом, червячные крупномодульные фрезы.

С помощью высокопрочных припоев (с пределом прочности на кручение более 30 кгс/мм²) можно изготовлять концевой инструмент с паяным соединением присоединительной части с режущей. В этом случае соединяемые части подвергают механической и термической обработкам раздельно. Пайка является сборочно-соединительной операцией. При механической обработке резанием оставляется технологический припуск на последующие операции шлифования и затачивания. Пайку проводят в приспособлении, обеспечивающем точность соединяемых частей инструмента в пределах 0,1—0,2 мм.

Список литературы

1. **Лысанов В. С.** Высокопроизводительный инструмент из эльбора. — Серия «Новости технологии». М., Машиностроение, 1975, с. 5.

2. **Синтетические** алмазы в обработке металлов и стекла. Под ред. Н. А Розно. М., Машиностроение, 1968. 256 с.

3. **Справочник** по пайке. Под ред. С. Н. Лоцманова, И. Е. Петрунина, В. П. Фролова. М., Машиностроение, 1975, с. 62—72.

4. **Тарасов В., Шапиро Л.** Высокочастотная напайка быстрорежущего инструмента. Реферативный сб. «Металлорежущий и контрольно-измерительный инструмент». Вып. 6. М., НИИМАШ, 1973, с. 9—14.

5. **Технология** сварки, пайки и контроля заготовок режущего инструмента. Технические рекомендации М., НИИМАШ, 1976. 108 с.

Глава 17

ПАЙКА И СВАРКА НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

ПАЙКА И СВАРКА КЕРАМИКИ С МЕТАЛЛАМИ

Керамикой называют материалы, сформованные из глин и других минеральных порошков, упрочненные путем обжига при высокой температуре. По такой же технологии получают металлокерамику, ферриты, карбиды, нитриды, силициды и другие безглинистые материалы. Температура плавления некоторых керамик 2000—3000° С; их теплопроводность значительно ниже теплопроводности металлов. Керамика обладает высоким удельным сопротивлением и электрической прочностью. Высокая механическая прочность, стабильность свойств керамических материалов и геометрических размеров керамических деталей обеспечивают длительную работоспособность при температурах до 1400—1700° С. Хорошая химическая устойчивость керамических материалов и металлокерамических узлов на их основе делает эти материалы в ряде случаев незаменимыми в химической промышленности. Одним из основных потребителей металлокерамических конструкций является промышленность, выпускающая электровакуумные приборы.

Керамические материалы содержат структурные элементы кристаллического и стеклообразного строения. Все керамические материалы по характеру структуры можно разделить на две группы: материалы с матричной стекловидной фазой, в которой статистически распределена дисперсная кристаллическая фаза; материалы, в которых кристаллическая фаза непрерывна и образует скелет керамического тела. Существует большое разнообразие структурных видов в зависимости от химического состава и технологии изготовления.

Некоторые виды структур вакуумно-плотной поликристаллической керамики приведены в табл. 1. В табл. 2 приведена классификация отечественных вакуумно-плотных керамических материалов по их химическо-минералогическому составу.

1. Виды структур поликристаллической керамики

Структура с матричной фазой	Марка
Стекловидной	
Стеклофаза не закристаллизована; стеклофаза закристаллизована частично или полностью; кристаллическая фаза представлена одним, двумя кристаллическими соединениями и более	102, стеатиты
Кристаллической	
Полифазная с ограниченным объемом стекла, монофазная беспористая	Сапфирит, 22ХС, 22Х, М-7, Ф-17, поликор, ГМ

Свойства керамических материалов на основе Al_2O_3. Промышленность выпускает керамические материалы на основе Al_2O_3, которые можно использовать для вакуумно-плотного соединения с металлами. Алюмооксидная керамика, называемая иногда также высокоглиноземистой, содержит более 80% окиси алюминия. Алюмосиликатная керамика содержит относительно большое количество SiO_2, BaO и CaO, а окиси алюминия содержится 50—60%. Керамические материалы на

основе Al_2O_3 обладают различными свойствами. Повышение содержания основного окисла сопровождается значительным улучшением свойств материалов, но использование чистых окислов приводит к усложнению технологии получения керамических деталей — требуется дополнительная очистка сырья, повышение температуры окончательного обжига и др. Поэтому наиболее широко применяются керамические детали из алюмооксидных масс с содержанием Al_2O_3 в пределах 90—97%.

2. Классификация вакуумно-плотных керамических материалов по их химико-минералогическому составу

Керамика	Марка	Основные окислы в составе материала
Магнезиально-сликатная: стеатитовая	ВК-92, К-1, С-4А, С-14	SiO_2, MgO, BaO
форстеритовая	Ф-17, ЛФ-11, КВФ-4	MgO, SiO_2
Алюмосиликатная	102	Al_2O_3, SiO_2, BaO, CaO
Алюмооксидная	22Х, 22ХС, А995, ВГ-IV, ГМ, М-7, сапфирит, поликор	Al_2O_3
Окисноберилиевая	Брокерит-9	BeO

Химический состав и основные физико-технические свойства некоторых керамических материалов на основе Al_2O_3 приведены в табл. 3 и 4.

3. Химический состав керамических материалов на основе Al_2O_3, %

Материал	Al_2O_3	SiO_2	Cr_2O_3	MnO	CaO	MgO	B_2O_3
22ХС	94,4	2,76	0,49	2,35	—	—	—
М-7	94,2	3,7	—	—	2,1	—	—
ВГ-1V	95,3	3,3	—	—	0,2	1,2	—
Сапфирит-16	98,0	—	—	—	—	0,5	1,5
Поликор	99,7	—	—	—	—	0,3	—

4. Основные физико-механические свойства керамических материалов на основе Al_2O_3

Свойства	Материалы				
	22ХС	М-7	ВГ-1V	Сапфирит	Поликор
Объемная масса, г/см³, не менее	3,65	3,60	3,65	3,89	3,98
Прочность при статическом изгибе, кгс/см², не менее	3200	3000	3100	3000	2500
Модуль упругости $E \cdot 10^4$, кгс/мм²	3,14	—	—	3,3 – 4,4	3,92

Ценность керамических материалов в значительной степени обусловлена высокими теплофизическими свойствами. Эти свойства определяют способность металлокерамических узлов надежно функционировать как в условиях стационарных тепловых потоков, так и при резкой смене температур, и больших их градиентах. В этом отношении такие свойства, как коэффициент линейного расширения (КЛР), теплопроводность и теплоемкость, влияют на прочность металлокерамических узлов при резких сменах температуры.

Температурные напряжения, возникающие в металлокерамическом соединении, в значительной степени определяются КЛР сопрягаемых деталей. Средние значения КЛР в интервале температур 20—900° С для рассматриваемых керамических материалов на основе Al_2O_3 составляют (80 ÷ 86) 10^{-7}1/° С. Для сравнения КЛР меди $197 \cdot 10^{-7}$1/° С, никеля $163 \cdot 10^{-7}$1/° С. В керамических материалах число свободных электронов мало, поэтому теплота передается в основном за счет упругих колебаний решетки. Этим и объясняется тот факт, что теплопроводность керамических материалов на один-два порядка ниже, чем теплопроводность металлов. Как и у металлов, при повышении температуры теплопроводность керамических материалов уменьшается. Теплоемкость большинства керамических материалов повышается с возрастанием температуры. При этом теплоемкость не зависит от строения кристаллической решетки и микроструктуры керамики. Удельная теплоемкость Al_2O_3 в интервале температур 100—1200° С возрастает от 0,20 до 0,30 ккал/(кгс·°С). Основными механическими свойствами керамических материалов являются прочность при изгибе, растяжении и сжатии; модуль упругости и коэффициент Пуассона.

5. Прочность при статическом изгибе некоторых керамических материалов, кгс/см²

Материал	Температура, °С		
	20	500	1000
22ХС	3700	3500	950
Сапфирит	3500	3400	2150

Прочность керамических материалов при статическом изгибе зависит от исходного состава масс, пористости, величины зерна, масштабного фактора и т. д. (табл. 5).

Для сравнения прочность меди при статическом изгибе (при 20°С) 14 — 28 кгс/мм². Прочность при разрыве вакуумно-плотных керамических материалов изменяется подобно прочности при статическом изгибе. Прочность при сжатии для плотноспеченных керамических материалов высока. Так, микролит, содержащий 99,0—99,2% Al_2O_3, имеет прочность при сжатии 100 кгс/мм² (для меди σ_c = 60 кгс/мм²). Поэтому керамические детали должны работать в условиях сжатия. Прочность керамики зависит от размеров детали; при увеличении диаметра испытуемого образца прочность уменьшается.

Модуль упругости керамических материалов зависит от химического состава, температуры и пористости:

Керамика	$E \cdot 10^4$, кгс/мм²
Спеченная окись алюминия (пористость 5%)	3,9
Алюмооксидная	3,7
Стеатит	0,7
Алюмосиликатная	1,4

Модуль упругости меди 12 200—13 000 кгс/мм², а никеля (в зависимости от чистоты) 18 000—22 700 кгс/мм². Все керамические материалы мало деформируются под нагрузкой, поэтому коэффициент Пуассона для большинства материалов составляет 0,2—0,3.

Газовыделение и газопроницаемость высокотемпературных окислов и керамических материалов на их основе определяются свойствами основного компонента, входящего в керамический материал, а также технологическим процессом его изготовления. Газовыделение из керамики происходит в результате диссоциации окислов, десорбции газов, поглощенных при изготовлении, и выделения легколетучих примесей. Диссоциация окислов керамики происходит под действием высоких температур или при бомбардировке керамической поверхности электронами, имеющими высокую энергию. Высокие температуры не влияют на газовыделение, которое мало и не превышает газовыделение из меди, никеля и др.

Газовыделение керамик некоторых марок при нагреве в вакууме до 900° С приведено в табл. 6.

6. Газовыделение керамик

Марка керамики	Количество газа, $\times 10^3$, л·мм рт. ст./см²	Объемная доля газов, %			
		H_2	N_2+CO	CO_2	H_2O
22ХС	1,2	55	40	3	2
22Х	0,6	55	40	3	2
102	2,0	57	31	10	2
Ф-17	3,0	48	44	6	2
С-14	3,6	50	42	5	3

Газовыделение плотной керамики определяется площадью поверхности и практически не зависит от ее объема и массы и связано лишь с газовыделением поверхности и приповерхностного слоя толщиной около 20 мкм; газовыделение у металлов происходит из всего объема.

Газопроницаемость керамических материалов на основе Al_2O_3 в основном определяется плотностью этих материалов. При пористости 3—5% материалы непроницаемы для кислорода, азота, аргона, гелия и других газов до 1400—1500°С. Чистая окись алюминия остается газонепроницаемой при температурах до 1500° С в течение 2 ч. Увеличение пористости до 7—10% сопровождается повышением газопроницаемости с ростом температуры.

Электрические свойства. Удельное электрическое сопротивление керамики $1 \cdot 10^{14}$ Ом·см при 100° С. Удельное электрическое сопротивление с увеличением температуры уменьшается (рис. 1). Керамика обладает высокой электрической прочностью. Температурные зависимости электрической прочности $E_{пр}$ керамики при постоянном и переменном напряжении приведены на рис. 2.

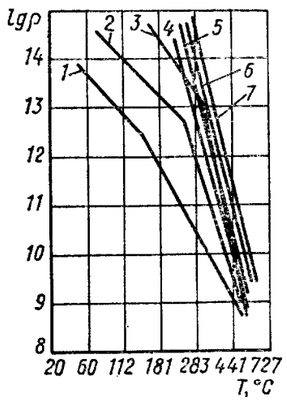


Рис. 1. Зависимость удельного электрического сопротивления керамики от температуры:

1 — 102; *2* — 22ХС; *3* — А-995; *4* — КВФ-4; *5* — М-7; *6* — брокерит-9; *7* — поликор

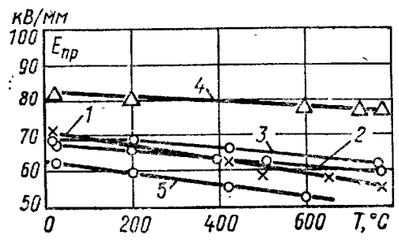


Рис. 2. Зависимость электрической прочности керамики при постоянном (*1—4*) и переменном 50 Гц (*5*) напряжениях:

1, 5 — керамика 22ХС; *2* — поликор; *3* — ГМ; *4* — форстерит

Конструирование спаев металла с керамикой. Вследствие различия КЛР, теплопроводности и теплопередачи в соединениях спая металла с керамикой возникают тепловые напряжения, которые могут привести к разрушению керамической детали. При конструировании спаев необходимо принимать меры против возникновения тепловых напряжений.

Конструкции спаев делятся на согласованные и несогласованные. Согласованными называют спаи, у которых КЛР близки в широком интервале температур. Несогласованными спаями называют такие, у которых КЛР различаются значительно.

В зависимости от взаимного расположения и формы металлических и керамических деталей все металлокерамические узлы можно разделить на четыре группы: конические охватывающие, цилиндрические охватывающие, охватываемые и торцовые. Охватывающие узлы, — в которых металл охватывает керамическую деталь по наружной поверхности; охватываемая керамическая деталь охватывает металлическую; торцовые, в которых керамические и металлические детали сочленяются по торцу. Наиболее характерные примеры конструкций указанных типов приведены на рис. 3.

Охватывающие спаи являются наиболее распространенными. Цилиндрические охватывающие спаи рекомендуются для согласованных спаев. При необходимости изготовлять несогласованный спай (керамика + медь) рекомендуется конический охватывающий спай. Торцовые спаи наименее надежные. Сложность

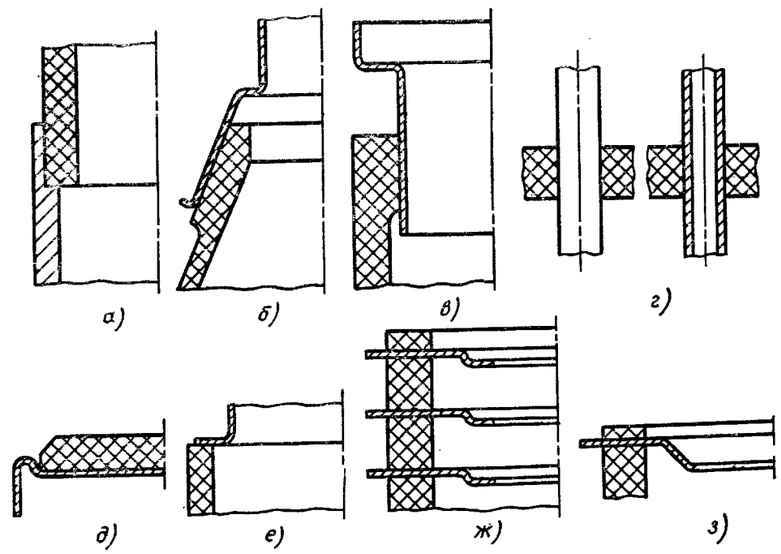


Рис. 3. Конструкции спаев металла с керамикой:

а — цилиндрический охватывающий; *б* — конический охватывающий; *в, г* — охватываемые; *д—з* — торцовые

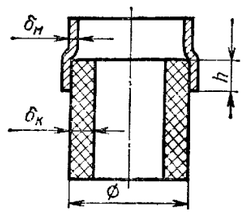
конструирования металлокерамических спаев связана с необходимостью компенсации возникающих собственных остаточных напряжений в конструкции, для чего используют некоторые приемы. Зазоры между спаиваемыми деталями должны быть оптимальными. При пайке медью такой зазор равен 0,025 мм. В охватывающих спаях ковара (железоникелевого сплава) керамическая деталь находится в напряженном состоянии — радиального сжатия. При пайке молибдена с высокоглиноземистой керамикой с использованием охватывающего спая должен быть предусмотрен зазор $S_т = d \cdot 165 \cdot 10^{-5} + 0{,}03$ мм, где d — диаметр детали. Преимуществом конических охватывающих спаев является уменьшение зазора между керамикой и металлами. При их изготовлении не требуется точной подгонки по диаметру сопрягаемых поверхностей. В узлах с охватывающими спаями в качестве металла чаще используют ковар, медь и титан. Рекомендуемые параметры элементов охватывающих спаев приведены в табл. 7.

Пайка керамических материалов с металлами. Известны несколько способов получения паяных вакуумно-плотных металлокерамических соединений — пайка предварительно металлизированных керамических материалов твердыми припоями, пайка по активной технологии и др. Первый способ относится к многоступенчатой, а второй — к одноступенчатой технологии.

Пайка предварительно металлизированной керамики твердыми припоями. Процесс получения металлокерамических узлов по многоступенчатой технологии состоит из двух основных операций: металлизации керамики с образованием прочно

соединенного с керамикой металлизационного слоя в процессе «вжигания» и пайки металлизированной керамики с металлом с использованием припоев. Сущность металлизации состоит в нанесении на поверхность керамики металлов (Mo, W или Re) с добавками Fe. Наиболее широко для металлизации керамических материалов используют порошки из молибдена с небольшой добавкой железа («молибденовая технология»), молибдена с добавкой марганца («молибденово-марганцевая технология») и карбидов тугоплавких металлов («карбидная технология»). Основное назначение вводимых добавок состоит в том, чтобы в процессе вжигания металлизационных покрытий было получено прочное соединение основного компонента покрытия с керамикой. Наиболее употребительные составы, применяемые для металлизации вакуумно-плотных керамических материалов, приведены в табл. 8.

7. Рекомендуемые параметры элементов охватывающих спаев (цилиндры из высокоглиноземистой керамики)



Параметры	Диаметр керамического цилиндра, мм			
	6—10	12—24	30—45	50—65
Толщина стенки керамического цилиндра $\delta_к$, мм	1,5—2,5	2,0—4,5	3,0—4,0	5,0—7,0
Ширина зоны спая h, мм	2,0—2,5	3,0—4,0	4,0—6,0	5,0—7,0
Толщина манжеты в зоне спая $\delta_м$, мм, из металла:				
ковара	0,3—0,5	0,3—0,5	0,5—0,8	0,8—1,0
никеля	0,2	0,3	—	—
меди	0,5	0,5—0,7	—	—
титана	0,7	0,8—1,0	—	—
Допустимая температура нагрева спая, °С, при использовании:				
ковара	650—700			
меди	600—700			
титана	700—750			

Технология подготовки керамики к пайке заключается в подготовке металлических порошков и приготовлении из них металлизационных паст, нанесении и вжигании металлизационной пасты, нанесении второго слоя металла на металлизационное покрытие (никелирование, меднение и др.), ультразвуковой очистке металлизированных деталей. Металлические порошки и пасты изготовляют по специальной технологии. Приготовленную металлизационную пасту наносят на поверхность керамики, подлежащую пайке несколькими способами: кисточкой, роликом, окунанием, на специальных станках методом пульверизации и др. При этом способе внимание обращается на толщину слоя пасты (40—50 мкм) и его равномерность. Вжигание металлического покрытия (пасты) осуществляют во

8. Составы металлизационных покрытий

Керамика	Массовая доля, %	Керамика	Массовая доля, %
Стеатитовая К-1	98 Mo, 2 Fe	Алюмооксидная: 22ХС	80 Mo, 20 Mn
Форстеритовая ФС-5Л	96 Mo, 4 Mn		80 Mo, 20 Mn, 5 Si (св. 100)
	63,8—74 Mo, 0,8—6,1 TiH_2, Al_2O_3 остальное		80 Mo, 10 Mn, TiH_2
Алюминосиликатная 102	60 WC, 10 TiC, 35 Fe	М-7	77 Mo, 20 Mn, 3 $MoSi_2$
			80 Mo, 14 Mn, 6 FeSi
			80 Mo, 10 Mn, 10 TiH_2
Бериллиевая	80 Mo, 20 Mn, 5 Si	ВГ-IV	75—78 Mo, 20 Mn, 5—2 Si
Алюмооксидная 22Х	100 Mo	Сапфирит	75 Mo, 20 Mn, 5 V_2O_5
		Поликор	95 W, 5 I_2O_3

9. Режимы вжигания металлизационных покрытий и составы газовых сред

Состав покрытия, керамический материал	Максимальная температура вжигания, °С	Время выдержки при максимальной температуре, мин	Скорость нагревания и охлаждения, °С/мин	Состав газовой среды, влажность
Вольфрамовые покрытия на керамике типа ГМ, поликор, сапфир	1640—1680	60	~ 2	Водород, точка росы +20 ÷ +25 °С
Молибденовое покрытие: на алюмооксидной керамике 22ХС, М-7, ВГ-IV, ГМ и др.	1270—1400	20—40	8—20	$N_2 : H_2 = 2 : 1$ или $N_2 : H_2 = 3 : 1$, точка росы +15 ÷ +25 °С
на форстеритовой керамике ФС-5Л, АФ555	1120—1170	25	18	Водород или $N_2 : H_2 = 2 : 1$, точка росы +15 ÷ 30 °С
на бериллиевой керамике	1280—1320	40	До 500 °С 1,6; выше 500 °С 4,2; охлаждение с печью	$N_2 : H_2 = 3 : 1$, точка росы +25 ÷ −25 °С
с добавками железа на стеатитовой керамике	1280—1320	10—20	10—20	$N_2 : H_2 = 3 : 1$, точка росы +20 °С

влажном водороде или формиргазе [1] в электрических печах; параметры режима вжигания приведены в табл. 9.

Наиболее сложные физико-химические процессы, предшествующие получению металлокерамических спаев по многоступенчатой технологии, протекают при вы-

[1] Азотно-водородная смесь с отношением азота к водороду 2 : 1 или 3 : 1.

сокотемпературном спекании тугоплавких порошков и активизирующих добавок на поверхности керамических деталей. В результате протекания этих процессов образуется прочно соединенный с керамикой металлизационный слой, который и обеспечивает последующую пайку керамики с металлом.

В основе процессов, протекающих при металлизации керамики, лежит химическое взаимодействие компонентов пасты с окислами керамики с образованием промежуточного переходного слоя, которое происходит в восстановительной атмосфере с достаточно высоким содержанием паров воды, окисляющих некоторые из компонентов металлизационных паст. При металлизации высокоглиноземистой керамики молибдено-марганцевой пастой промежуточный слой между ними образуется следующим образом: часть марганца окисляется до окиси по реакции $Mn + H_2O \rightarrow MnO + H_2$. Окисленный марганец при температурах выше 1000 °С вступает в реакцию с керамикой с образованием алюмомарганцевой шпинели $Al_2O_3 \cdot MnO$. Алюмомарганцевая шпинель способствует закреплению металлизационного покрытия. С ростом температуры этот процесс ускоряется, но уже при 1300—1350° С начинается обратный процесс, связанный с разложением алюмомарганцевой шпинели и выпадением кристаллов корунда. Кроме образования алюмомарганцевой шпинели, возможно взаимодействие MnO с SiO_2 с образованием роденита $MnO \cdot SiO_2$ и с окислами щелочноземельных металлов с образованием твердых растворов в системах MnO — CaO и MnO — MgO.

Прочная связь керамики с металлизационным слоем также образуется при миграции стеклофазы керамики в металлизационный слой; при этом стеклофаза прочно сцепляется с кристаллической фазой керамики ($\alpha = Al_2O_3$) и с металлом (молибденом). После нанесения металлизационного слоя и контроля его свойств наносится слой металла, обеспечивающий защиту металлизационного слоя от взаимодействия его с жидким металлом и улучшающий растекание припоя. В качестве слоя металла наносятся никель и железо, а также никель-рениевые сплавы гальваническим или химическим способами. При пайке керамики золотыми и серебряными припоями применяют никелевые слои толщиной 3—5 мкм. После нанесения покрытия детали тщательно промывают в проточной воде, а затем в дистиллированной воде с применением ультразвука.

Сборка под пайку охватывающих спаев — несложная операция, однако важным является обеспечение минимальных зазоров. В некоторых случаях диаметры металлических деталей на 0,02—0,04 мм меньше диаметра керамических деталей; сборку таких деталей производят с использованием пресса.

При сборке и пайке узлов с плоскими или торцовыми поверхностями требуются центрирующие оправки и придавливающие грузы. Припой при пайке охватывающих спаев изготовляют в виде кольца из проволоки; для пайки торцовых поверхностей применяют припои в виде плоских колец или дисков толщиной 0,05—0,1 мм. Припой используют в отожженном состоянии. В качестве припоев применяют сплавы на основе серебра, золота и меди, позволяющие производить пайку металлокерамических узлов в интервале 685—1083° С. Более тугоплавкие припои изготовляют из медно-никелевых и хромоникелевых сплавов, обеспечивающих температуру пайки в интервале 1100—1453° С.

Пайку металлокерамических узлов производят в водородных контейнерах или колпаковых печах с применением сухого водорода, содержание паров воды в котором должно соответствовать точке росы — 20° С. Примесей кислорода должно быть не более 0,01—0,02% по объему.

При пайке узлов диаметром до 25 мм время нагрева и охлаждения 25—30 мин, узлов диаметром 25—35 мм — время 45—50 мин, узлов диаметром более 35 мм — время 90—100 мин. Время выдержки при пайке от 20 с до 1,5—2 мин.

Вжигание металлических покрытий (металлизация) — сложная технологическая операция. Для получения качественного соединения металлического покрытия с керамикой в процессе вжигания необходимо соблюдать технологию подготовки металлических порошков и паст, точно поддерживать состав среды, температуру вжигания и т. д. Качество соединения металлизационного слоя с керамикой определяет прочность паяного узла.

Надежность металлокерамической конструкции зависит от прочности керамики, прочности сцепления металлизационного слоя с керамикой, прочности сцепления металлизационного слоя и припоя, а также адгезии припоя к металлической детали. Эти операции делают пайку по многоступенчатой технологии сложным процессом, общая продолжительность которого измеряется часами.

Пайка с помощью активных металлов. Пайка по активной технологии упрощает получение паяного соединения керамики с металлом. Поскольку в данном случае отсутствует операция вжигания покрытия и металлизации, этот процесс относится к одноступенчатой технологии. Пайка по активной технологии основана на том, что при высокой температуре такие активные металлы, как титан и цирконий, образуют с припоями расплавы высокой реакционной способности — активные сплавы, которые растекаются по керамике и металлу, взаимодействуют с ними, обеспечивая получение прочного спая.

Пайку металлокерамических узлов по этой технологии можно выполнять различными способами: непосредственно с металлическими деталями из титана; припоями, содержащими титан; с помощью гидридов титана и циркония и т. д. Сущность этих способов состоит в том, что при вакууме $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. и повышенных температурах активные металлы (титан, цирконий) образуют с припоями расплавы высокой реакционной способности, которые взаимодействуют с окислами, составляющими керамику, обеспечивая получение прочного спая. При взаимодействии активных металлов (или сплавов) с окислами керамики последние частично восстанавливаются с образованием в пограничной зоне сложных растворов внедрения и замещения. Так, при взаимодействии Al_2O_3 с титаном окись алюминия частично восстанавливается (при 950° С) и отдает кристаллической решетке титана кислород с образованием твердого раствора внедрения. Алюминий, освободившийся при восстановлении Al_2O_3, также растворяется в титане, но с образованием твердого раствора замещения. При взаимодействии SiO_2 с титаном образуется твердый раствор кислорода в титане и возникают интерметаллические соединения титана с кремнием. Эти процессы являются определяющими в образовании прочного соединения при пайке металлокерамических изделий по активной технологии. Припой облегчает перенос активного металла к керамике и заполняет зазоры между керамикой и металлом.

Для пайки титана с алюмооксидными керамиками в качестве припоя используют сплав ПСр.72, серебро, медь, и никель, а также медно-титановые и никель-титановые сплавы. Пайка с помощью гидрида титана происходит по следующей технологии. Пасту из порошка гидрида титана наносят на керамику. После того как паста подсохнет, керамическую деталь собирают с металлической. В место спая помещают припой. Пайка происходит в вакууме $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. При нагреве до 450—550° С гидриды титана разлагаются, титан образует с жидким припоем активный сплав, который и обеспечивает получение вакуумно-плотного спая по ранее приведенному механизму. Пайку керамики с деталями из титана необходимо выполнять с использованием керамических материалов, согласованных по КЛР с титаном. При несоблюдении этого условия в зоне спая появляются трещины. Для получения высококачественного соединения необходимо возможно более плотное прилегание титановой детали к керамике и минимальное количество припоя. Пайку таких соединений осуществляют в печах при вакууме $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. или в среде аргона. Нагрев производят со скоростью 15—20° С/мин. Температура пайки превышает температуру плавления припоя на 20—40° С. Охлаждение после пайки происходит со скоростью 10° С/мин.

Методы пайки керамики с металлами находят применение в различных отраслях промышленности, особенно в массовом производстве металлокерамических узлов электронных и ионных приборов. Однако технология пайки и спаи керамики с металлами обладают некоторыми недостатками.

1. Сложность технологического процесса пайки, что связано с необходимостью проведения подготовительных операций, предшествующих пайке (металлизация, вжигание покрытия и ряд других). В процессе подготовки поверхности керамики под пайку производят промежуточные контрольные операции: контролируют

толщину металлизационного покрытия и прочность его сцепления с керамикой.

2. В ряде случаев паяные соединения не обеспечивают необходимые изоляционные свойства, так как в процессе пайки на поверхность керамики осаждаются пары припоя.

3. Паяные металлокерамические узлы не могут работать в условиях высоких температур (1200° С и выше); предельная рабочая температура паяных соединений не превышает, как правило, 800° С.

4. Применение при получении паяных металлокерамических узлов промежуточных металлов (металлизационных покрытий, припоев, технологических прокладок и т. п.) снижает их работоспособность в некоторых агрессивных средах. Это связано с тем, что промежуточный и основной металлы обладают разными электрохимическими потенциалами. Поэтому при работе паяных соединений в ряде агрессивных сред создаются условия для возникновения процессов электрохимической коррозии, которая с течением времени приводит к нарушению их герметичности. Многие недостатки, свойственные паяным металлокерамическим узлам можно устранить, используя для соединения керамики и металла метод диффузионной сварки.

Диффузионная сварка керамических материалов с металлами. При пайке металлокерамических узлов с использованием припоев образуется жидкая фаза. При сварке под давлением прочная связь керамики с металлами возникает в результате взаимодействия металла и керамики, находящихся в твердом состоянии. Механизм процесса и оборудование для диффузионной сварки подробно рассмотрены в томе 1 справочника.

Диффузионную сварку керамики с металлом применяют в основном для торцовых спаев. Процесс диффузионной сварки керамики с металлами осуществляется следующим образом. Свариваемые детали в местах сварки подвергают механической обработке. Металлическую деталь обрабатывают с получением параметра шероховатости $Ra = 1{,}6$ мкм. После этого детали отжигают для снятия напряжений и дегазации (Nb, Ti, Ta отжигают в вакууме $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.; Cu, ковар Н29К18, фени Н42 — в сухом водороде). Для очистки поверхности металлокерамические детали подвергают травлению, а во время сборки обезжиривают ацетоном или спиртом. Поверхности керамических деталей в местах сварки обязательно шлифуют. После подготовки свариваемых поверхностей собранные металлокерамические узлы помещают в рабочую камеру, где их нагревают до 750—1300° С. По достижении заданной температуры свариваемый металлокерамический узел подвергают сжатию так, чтобы удельная нагрузка была 0,5 — 2 кгс/мм². Время выдержки под нагрузкой в зависимости от соединяемых материалов изменяется в пределах 2—60 мин, после чего температура снижается, и при 200—250° С нагрузка снимается. Параметрами (табл. 10), определяющими процесс сварки, является температура нагрева изделий, удельная нагрузка, время сварки и среда, в которой производят сварку (вакуум, водород, формиргаз).

На качество соединения влияет состав атмосферы, в которой производят сварку. Большинство высокоглиноземистых керамик образуют с медью в водороде и формиргазе вакуумно-плотные соединения; в вакууме таких соединений получить не удается. Хорошие результаты при диффузионной сварке наблюдаются при соединении керамики с пластичными металлами (медью, никелем и др.). Получены также соединения с титаном, ниобием, коваром, сталью 12Х18Н10Т, нихромом и др. При сварке с тугоплавкими металлами вакуумно-плотные соединения получить не удалось, поэтому сварку их производят через прокладки из меди, никеля или титана или по предварительно металлизированной поверхности. Метод диффузионной сварки применяют в основном для торцовых соединений; к штырьковым конструкциям он неприменим. Этот недостаток ограничивает применение диффузионной сварки ряда узлов.

Соединения керамики с металлом, выполненные методом диффузионной сварки, обладают некоторыми преимуществами по сравнению с соединениями, выполненными пайкой: повышается рабочая температура металлокерамических узлов;

соединения способны выдерживать многократные нагревы в вакууме без потери вакуумной плотности и способны выдерживать более 15 термоударов в цикле 20—600 — 20° С без потери вакуумной плотности; прочность соединений примерно в 1,5 раза выше прочности паяных соединений; узлы обладают более высокими изоляционными свойствами.

10. Режимы диффузионной сварки керамики с металлами

Материал	Режим сварки				Механическая прочность, кгс/см²
	Среда	Температура, °С	Удельная нагрузка, кгс/мм²	Время выдержки, мин	
22ХС + медь	H_2	1000	1,8	10	2000
22ХС + ковар					1000
102 + 12Х18Н9Т		1200		15	1150
102 + ковар					1000
102 + медь Mg + медь		1000		10	1200
22ХС + титан	Вакуум $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.		1,2		

Электронно-лучевая сварка керамики с металлами. Используя установки для электронно-лучевой сварки, можно производить сварку керамики с металлами, получая при этом вакуумно-плотные соединения (табл. 11). Сварные соединения

11. Режимы электронно-лучевой сварки керамики со сталью 12Х18Н10Т

Керамические материалы	Толщина стенки стальной втулки, мм	Ток пучка, мА
22ХС	0,4	6
М-7	0,5	8
ЦМ 332	0,4	7
ГМ	1	15

Примечание. Диаметр пятна нагрева 0,6 мм, рабочий вакуум в камере 1×10^{-4} мм. рт. ст., ускоряющее напряжение 12 кВ, скорость сварки 60 м/ч.

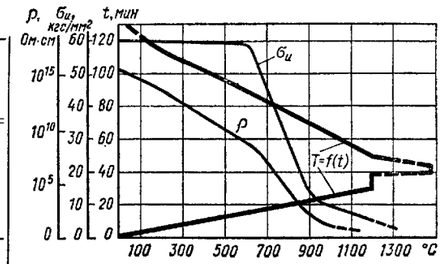


Рис. 4. Термический цикл электронно-лучевой сварки керамики со сталью 12Х18Н10Т

керамики на основе окиси алюминия могут быть получены расплавлением преимущественно металлической части узла или керамики. Первый способ образования сварного соединения используют, если температура плавления металла ниже температур плавления керамики. Второй способ используют, когда температура плавления керамики ниже температуры плавления металла, т. е. при сварке керамики с тугоплавкими металлами (ниобием, молибденом, вольфрамом). При электронно-лучевой сварке нет необходимости в предварительном шлифовании и металлизации, отсутствуют промежуточные прокладки, дорогостоящие серебряные припои и др.

Перед сваркой металлокерамические узлы нагревают до 900—1400° С со скоростью 30—50° С/мин. После сварки скорость охлаждения 10—50° С/мин. Изделия нагревают в нагревателе, имеющем молибденовую спираль, вмонтированную

в керамическую оболочку. Керамическая оболочка размещена внутри металлических экранов. Отверстия в нагревателе используют для наблюдения за процессом сварки. Питание нагревателя происходит выпрямленным током, который выключается в момент сварки. Сварку стали 12Х18Н10Т с керамикой ЦМ 322 при изготовлении проходных изоляторов с размерами керамической втулки $l = 15$ мм, $d = 10$ мм производят по следующему циклу: в течение 30 мин (рис. 4) изделие нагревают до 1200° С со скоростью 40° С/мин. При 1200° С следует выдержка в течение нескольких минут для выравнивания температуры. Выбор температуры

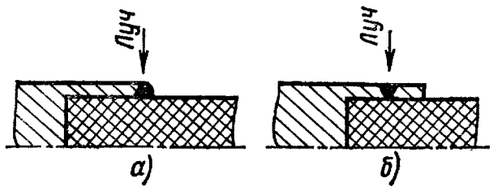


Рис. 5. Схема электронно-лучевой сварки керамики с металлом:

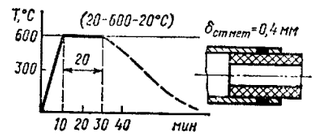
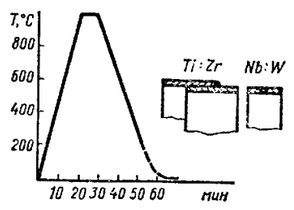
а — по кромке; *б* — проплавлением металла

нагрева при ЭЛС керамики с металлами обусловлен необходимостью обеспечения прохождения электрического тока через керамическую деталь и увеличения пластичности керамики. При 1200° С достигается достаточная проводимость и пластичность керамики. После сварки происходит контролируемое охлаждение со скоростью 15—20° С/мин. Скорость охлаждения регулируется до 500° С. После 500° С при свободном охлаждении нагревателя скорость охлаждения в среднем 15° С/мин; при этом необходимость в корректировке скорости охлаждения отпадает.

Электронно-лучевой сваркой могут быть выполнены охватывающие соединения металла с керамикой, как это показано на рис. 5, *а* и *б*.

Сварные соединения, выполненные электронно-лучевой сваркой, обладают высокими механическими свойствами — они вакуумно-плотны и достаточно термостойки. Термостойкость сварных соединений различных керамик с коррозионностойкой сталью и некоторыми металлами приведена в табл. 12. Штырьковое соединение можно получить путем расплавления керамики (рис. 6).

12. Термостойкость сварных соединений

Материалы	Цикл термоудара	Среда	Число циклов без нарушения вакуумной плотности
ЦМ 332 — 12Х18Н10Т		Воздух	15
ГМ — 12Х18Н10Т			10
М-7 — 12Х18Н10Т 22ХС — 12Х18Н10Т			15
ЦМ 332 — 12Х18Н10Т		Вакуум	10
М-7 — титан ГМ — цирконий ЦМ 332 — ниобий			15
22ХС — вольфрам Люкор — ниобий			10

Сварка различных керамических материалов. Для соединения различных керамических материалов используют те же методы, что и при соединении керамики с металлами (склеивание, пайку, диффузионную сварку и др.). Для этих методов необходимо применять металлы, что усложняет подготовку детали под сварку и снижает температуру эксплуатации изделий из керамических материалов. Соединение керамических материалов с помощью различных клеев не может быть использовано, если изделие предназначено для работы при высоких температурах.

Соединение, выполненное пайкой и диффузионной сваркой, получают с помощью металлических прокладок. При этом работоспособность сварного соединения будет определяться свойствами металла прокладки. Диффузионная сварка происходит с приложением значительных давлений, что может оказаться препятствием при соединении деталей сложной конфигурации и с малой толщиной стенок.

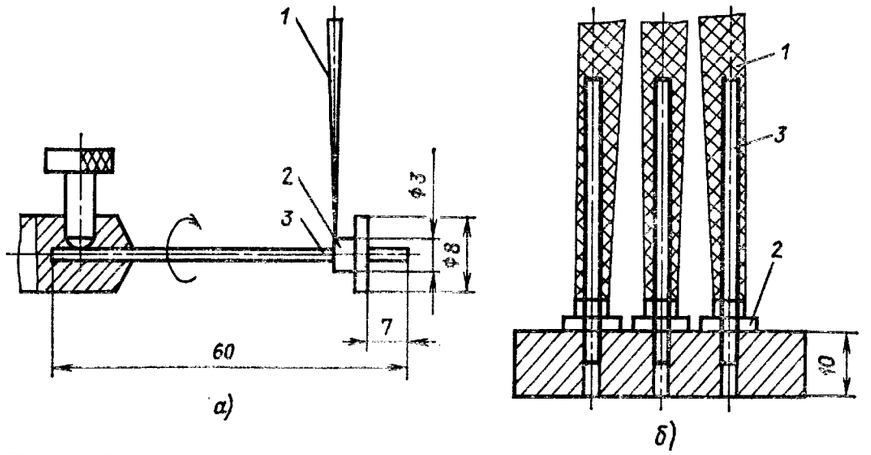


Рис. 6. Схема сварки штырькового соединения:

а — при горизонтально расположенном изоляторе; *б* — при вертикально расположенном изоляторе; *1* — электронный луч; *2* — керамика; *3* — вольфрам

Для соединения керамических деталей используют способ электронно-лучевой сварки, разработанный в МЭИ. Особенностью этого способа является наличие в сварочной цепи диэлектрика, вследствие чего на поверхности керамики накапливается электрический заряд и наблюдается расфокусировка луча. Для сварки необходим подогрев керамики до температуры, при которой керамика становится электропроводной. При сварке деталей с малой толщиной стенки подогрев осуществляют электронным лучом. При сварке керамических деталей с большой толщиной стенки необходим подогрев с использованием посторонних источников тепла — например, печей сопротивления.

Исследования свариваемости керамики 22ХС показали, что характер проплавления и форма зоны проплавления аналогичны проплавлению при сварке металлов. При сварке керамики для достижения одинаковой глубины проплавления требуется меньшая мощность луча по сравнению со сваркой металлов, что объясняется малой теплопроводностью керамики.

При электронно-лучевой сварке керамики необходимо соблюдать определенный цикл нагрева керамики, который нужен для обеспечения электропроводности керамики и некоторой пластичности. Температура нагрева керамики 22ХС 1550—1600 К.

На качество сварного соединения влияет скорость охлаждения соединения после окончания процесса сварки. Скорость охлаждения керамики в интервале

2200—1700 К высока (рис. 7). Однако охлаждение с такими скоростями в этом интервале температур не представляет опасности, так как стеклофаза керамики при этой температуре находится в пластичном состоянии. При 1600—1700 К стеклофаза твердеет, и поэтому скорость охлаждения необходимо контролировать, с тем чтобы напряжения, возникшие в керамике, не привели к образованию трещин. Скорость охлаждения керамики должна быть около 50° С/мин. Некоторое увеличение скорости охлаждения при температуре ниже 1000 К не влияет на свойства и прочность сварного соединения:

Температура, К	2250—1700	1700—1000	1000—300
Скорость охлаждения °С/мин	100	50	100

Петрографические исследования сварных соединений показали, что в результате сварки происходит хорошее сплавление основного и расплавленного материалов. Деталь из керамики 22ХС в виде трубки длиной 380 мм, диаметром 12 мм и с толщиной стенки 3 мм сваривают электронным лучом. Трубку приваривают к массивному колоколу длиной 60 мм, диаметром 50 мм с толщиной стенки 4 мм. Сварку производят на режиме: $u_л = 18$ кВ; $I_л = 25$ мА; $u_{св} = 20$ м/ч.

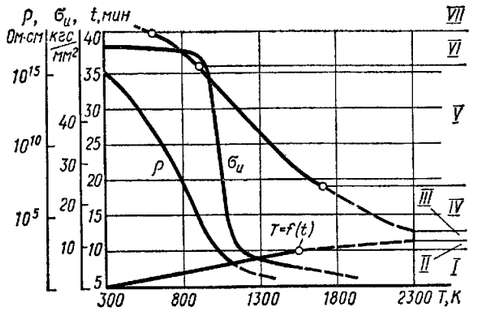


Рис. 7. Термический цикл сварки керамики 22ХС:

T — температура при сварке; ρ — электрическое сопротивление керамики; $\sigma_{из}$ — прочность при изгибе керамики во время нагрева; *I* — нагрев в печи сопротивления; *II* — нагрев электронным лучом; *III* — сварка; *IV* — охлаждение после сварки; *V* — контролируемое охлаждение в печи; *VI* — свободное охлаждение с печью; *VII* — охлаждение на воздухе

В электротехнической, металлургической и других отраслях промышленности широкое применение находят различные тигли, термопарные чехлы и т. п. Рабочая температура материалов 2100—2200 К. Этим требованиям удовлетворяет алунд, в котором содержится около 98% окиси алюминия. В качестве добавок применяют окись титана и окись железа, которые придают этой керамике повышенную огнеупорность. Керамика ЦМ 322 относится к керамическим материалам, состоящим из чистой окиси алюминия и не имеющим примесей, и содержит свыше 99% окиси алюминия.

Электронно-лучевую сварку этих керамик производят также с подогревом. Температура подогрева 1800—1850 К. Режим сварки трубок из керамики ЦМ 322 диаметром 18 мм с толщиной стенки 5 мм следующий: $u_л = 18$ кВ; $I_л = 30$ мА; $v_{св} = 15$ м/ч. На получение высококачественных соединений влияет скорость охлаждения деталей после сварки. При больших скоростях сварки (40—50° С/мин) наблюдается образование трещин. Оптимальная скорость охлаждения 20—25° С/мин. При сварке алунда с содержанием окиси алюминия около 75% температура подогрева 1400—1450 К.

Прочность сварных соединений при испытании на растяжение 85—90% прочности основного материала. Сварные соединения, полученные электронным лучом, являются герметичными. Результаты их испытания на термостойкость при нагреве до 1100 К и охлаждении с различными скоростями на воздухе до 300 К представлены на рис. 8. При охлаждении сварного соединения со скоростями 50 К/мин и менее такие соединения вполне работоспособны. Особенностью электронно-лучевой сварки керамики является возможность соединения керамики различных марок.

ПАЙКА И СВАРКА ГРАФИТА

Пайка графита. Графит обладает рядом свойств, позволяющих применять его в ответственных конструкциях (табл. 13). Обладая наиболее высокой температурой плавления, графит легок, относительно прочен, имеет достаточно высокую теплопроводность и низкий коэффициент линейного расширения, благодаря чему он весьма стоек против теплового удара и удобен для создания конструкций, требующих сохранения формы и хороших механических свойств при высоких

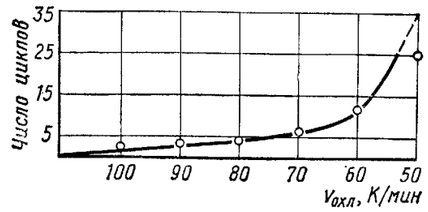


Рис. 8. Влияние скорости охлаждения на термостойкость сварных соединений керамики

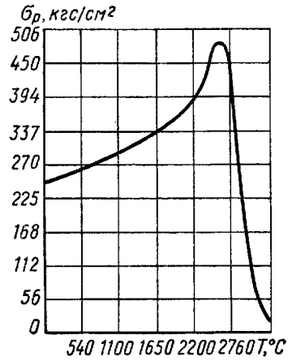


Рис. 9. Изменение прочности графита в зависимости от температуры

температурах. Особенно ценное свойство графита как материала, работающего при высоких температурах, — увеличение его прочности и электропроводности с повышением температуры (рис. 9). Прочность графита при 2500—2700° С почти в 2 раза выше, чем при 20° С. В этом интервале температур прочность графита больше, чем прочность наиболее тугоплавкого металла — вольфрама. Область применения графитовых материалов достаточно широка; это детали и узлы энергомашиностроения, авиационной, химической промышленности и т. д.

13. Сравнительные свойства графита и вольфрама

Свойства	Графит	Вольфрам
Плотность, г/см³	2,23 (истинная)	19,3
Температура плавления, °С	3900	3410
Коэффициент теплопроводности при 20 °С, кал/(см·°С)	0,32	0,40
Коэффициент линейного расширения, 10^6, 1/°С	3,5	4,4
Удельное электросопротивление, 10^6, Ом·см	8—20	5,5
Модуль упругости, 10^4, кгс/мм²	0,09—0,17	3,5
Прочность при растяжении, кгс/мм²	1,3—2,5	110

Изделия из угольных и графитовых материалов выполняют преимущественно прессованием в формы с последующим обжигом и термической обработкой. Однако этот способ, пригодный для изготовления сравнительно малогабаритных деталей простой конфигурации, не годится для создания ответственных конструкций сложной конфигурации и больших размеров. Один из основных недостатков, препятствующих широкому применению графитовых деталей, заключается в том, что считали невозможным создать соединение из графита с получением в месте соединения материала, не отличающегося по свойствам от свойств графита. Соединения графитовых деталей пытаются получить с помощью методов пайки и сварки с применением промежуточного карбидообразующего металла. Такие

методы позволяют получать соединения, удовлетворяющие многим, но не всем, условиям работы графитовых деталей, так как свойства их в значительной степени отличаются от свойств графита и определяются свойствами промежуточного материала.

Соединение графита с графитом может быть осуществлено механическими методами (болтовые соединения, соединения с помощью муфт, запрессовкой и др.). Широко используют склеивание; при этом применяют различные замазки (арамзитовую, базальтовую, фугеровочную и др.). Эти методы соединения имеют недостатки: увеличиваются габариты изделия, не достигается герметичность изделий, недостаточная стойкость в агрессивных средах, малая рабочая температура и т. п. В связи с этим использование механических методов соединения ограничено.

14. Состав припоев для пайки графита

Состав припоя	Температура пайки, °С	Атмосфера пайки	Пайка
Титан, цирконий	1800—1860	Вакуум $1 \cdot 10^{-1}$—$5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.	Деталей, работающих при температуре, °С: до 1000
Кобальт, никель	1300	Водород	700
Кремний	1440—1460	Вакуум $1 \cdot 10^{-1}$—$5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст	до 700
Платина	1800	Инертный газ	» 1600
10—40% Cr, остальное железо; 10—50% Ni, остальное железо	1200—1600	Вакуум	Тиглей и огнеупорной футеровки в неокисляющей атмосфере
35% Au, 35% Ni и 30% Mo	1200	Инертный газ	Деталей, работающих в контакте с расплавленными фтористыми солями
82% Au, 18% Ni	950		
13% Si, остальное алюминий	577	Вакуум	Деталей, работающих при температуре, °С: до 700 до 1000
16% Si, остальное медь	800		
4,8% Si, остальное серебро	830		
16—30% Cr, 6—25% Ni, 0—4% Mo (Ti или Zr), менее 0,2 C, остальное железо	1200—1600	Инертный газ	

Наибольшее распространение для соединения графитовых деталей получила пайка. Основное затруднение при пайке графита состоит в различном КЛР графита и припоя. Значительное различие КЛР приводит к возникновению трещин в паяном соединении. К припоям, используемым для пайки графита, предъявляются следующие требования: хорошая смачиваемость графита, жидкотекучесть, обеспечение высокой прочности, достаточной пластичности соединения и др. В патентах приводится большое количество различных припоев для пайки графита. Некоторые из них приведены в табл. 14.

При пайке графита с графитом необходимо соблюдать требования, предъявляемые к сборке под пайку и к процессу пайки: 1) соблюдение минимальных зазоров между деталями; 2) предварительная дегазация графитовых деталей; 3) обеспечение защиты места пайки флюсами, инертными газами или вакуумом; 4) использование оптимального количества припоя. Методы пайки припоями используют достаточно широко, однако основным недостатком этого метода является невысокая рабочая температура паяного соединения.

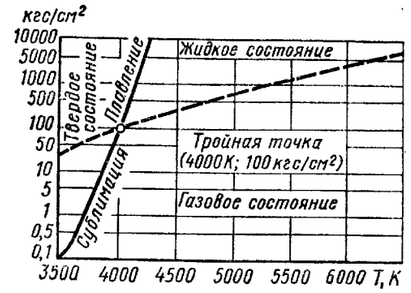


Рис. 10. Диаграмма агрегатного состояния углерода

Способ соединения графитовых деталей пайкой с получением шва, состоящего из карбидообразующего металла, заключается в том, что некоторые металлы (титан, цирконий, молибден, ниобий и др.) при 2000—2500° С интенсивно взаимодействуют с углеродом, образуя карбиды. Температура плавления таких карбидов высока (TiC — 3150° С, ZrC — 3530° С, MoC — 2700° С, NbC — 3480° С, TaC — 3880° С), поэтому соединения графита с карбидной связкой обладают высокой жаропрочностью. Процесс пайки состоит в том, что нанесенные на соединяемые поверхности карбидообразующие металлы (металлизацией, пастами, прокладкой фольги и т. п.) подвергают нагреву различными способами (электроконтактными, индукционными, в печах сопротивления и др.).

Процесс пайки рекомендуется производить в два этапа. На первом этапе детали нагревают до температуры, превышающей температуру плавления припоя на 30—50° С, для того, чтобы металл расплавился и пропитал соединяемые графитовые поверхности. После этого температуру повышают до температуры полной карбидизации металла. Для титанового припоя температура нагрева для первого этапа составляет 1650° С и для второго 2200° С. Соединение при этом способе пайки образуется за счет проникновения в графит и последующей кристаллизации жидкого расплава эвтектического состава типа MeC—C. Прочность соединения зависит от глубины проникновения расплавленной эвтектики. Сварные соединения обладают удовлетворительной прочностью, если эвтектический расплав проникает на глубину не менее 2 мм.

Сварка графита. Дуговая сварка. Создание монолитных соединений затрудняется тем, что при атмосферном давлении нельзя получить графит в жидком состоянии, так как при температурах значительно более низких, чем температура точки плавления, наблюдается интенсивная сублимация графита. Плавление графита может происходить лишь при давлениях выше 100 кгс/см² и температуре, превышающей 4000 К (рис. 10). Следовательно, сваривать графит с графитом, с применением обычных способов создания неразъемного соединения путем расплавления, последующего охлаждения и кристаллизации графита в сварном соединении необходимо в герметичных камерах высокого давления (150—200 кгс/см²), что усложняет сварку, ограничивает размеры детали и затрудняет эксплуатацию установки.

При классической схеме плавления соединяемых деталей сварка происходит в камере с инертной атмосферой при давлении 160—185 кгс/см². Между графитовым стержнем и блоком графита возбуждают дугу, которая плавит графит. После охлаждения и кристаллизации расплава образуется сварное соединение. Работы, проведенные в ИЭС им. Е. О. Патона, показали, что прочность графитового

соединения, полученного таким способом, значительно ниже прочности основного материала вследствие низкой прочности переплавленного графита. Способ сварки при высоком давлении связан с созданием массивных камер высокого давления, эксплуатация которых в производственных условиях представляет значительные трудности, а образующийся графит мягок и по прочности значительно уступает свариваемому графиту.

Иной способ сварки графита при атмосферном давлении, предложенный в МЭИ, состоит в том, что используют особенность горения интенсивной (плотность тока 40—100 А/см^2) угольной дуги. Высокоинтенсивная угольная дуга при определенных условиях переносит часть испаряющегося анодного материала на катод. На этой основе разработан метод дуговой сварки угольным электродом графита с графитом, заключающийся в испарении анодного материала и последующей кристаллизации паров графита на катоде-изделии. При высокой плотности тока в дуге на аноде выделяется большое количество энергии, вследствие чего материал анода интенсивно испаряется. На поверхности анода возникают потоки (факелы) паров графита, движущиеся с большой скоростью (до 10—50 м/с). Часть испарившегося материала переходит в дуге в ионизированное состояние, и поток вливается в общий поток, направленный от анода к катоду. Этот поток увлекает за собой и незаряженные частицы углерода в виде нейтральных атомов и мелкодисперсных частиц. На катоде пары графита охлаждаются и кристаллизуются, переходя непосредственно из газовой фазы в твердую. При этом образуются прочные связи со свариваемым графитом и характерная структура графита шва.

Установки для сварки графита имеют головку, обеспечивающую автоматическую подачу электрода, пульт управления, кожух для защиты от излучения и вентиляционное устройство для отсоса газов, выделяющихся при сварке. Различают головки двух типов: с подачей электрода без вращения и с вращением. Скорость подачи электрода 4—11 м/ч. В сварочных головках для стабилизации горения дуги применяют магнитное дутье. Питание дуги осуществляется от двух параллельно соединенных генераторов ПС-300М или одном ПС-1000.

Исследования шлифов из графитовых наплавок показали, что наплавленный графит плотный и имеет слоистое строение. В местах перехода от наплавленного графита к основному дефектов не обнаружено. Соединение наплавленного графита с основным хорошее. При большом увеличении в наплавленном графите наблюдаются характерные для пирографита конусы из кристаллического графита. При сварке на повышенном режиме с использованием электродов больших диаметров микроструктура наплавки состоит из мелких кристаллов графита, равномерно распределенных по всему полю. Плотность графита сварного соединения 1,8—1,85 г/см^3, т. е. выше плотности основного материала графита, полученного методом спекания. Однородные слои, имеющие весьма плотное строение, чередуются с менее плотным межслойным пространством. В случае применения мощной дуги плотность соединения 2,08 г/см^3.

Прочность сварных соединений графита приведена на рис. 11. Коэффициент наплавки $\alpha_н = 1$ г/(А·ч) получен при скорости подачи 11 м/ч, токе 160 А и напряжении 40 В. Малый коэффициент наплавки по сравнению с тем, который получается при сварке сталей, объясняется меньшей плотностью графита. При всех скоростях подачи электрода увеличение мощности вызывает увеличение коэффициента наплавки. По сравнению с характеристиками основного материала плотность графита шва в большинстве случаев выше, а прочность сварных соединений графитовых материалов примерно такая же. Технология дуговой сварки графита позволяет получать соединения графита с графитом различных типов.

Сварка нагревом в жидких углеводородах. В МЭИ были проведены работы по соединению графитовых материалов с получением сварного соединения, не отличающегося по свойствам от основного графита. Для сварки графитовых материалов было использовано разложение химических соединений углерода при нагреве их до высоких температур. Способ сварки деталей из графитовых материалов заключается в том, что две свариваемые детали *1* (рис. 12) укрепляют в токопроводах *2* приспособления для сварки и опускают в бак *3*, наполненный жидки-

ми углеводородами (маслом и др.). Детали нагреваются проходящим током от сварочного источника питания *4* (типа ПС-500 или ТСД-1000). При прохождении электрического тока свариваемые детали нагреваются до высоких температур. Вокруг места сварки на нагретых деталях образуется область паров минерального масла. При соприкосновении паров минеральных масел C_nH_{2n} с деталью, нагретой до 1700° С, происходит разложение паров масла с осаждением на поверхности детали углерода и выделением газов.

При разложении паров масел типа C_nH_{2n} образующиеся атомы углерода связываются с поверхностными активными атомами графита детали. В результате последовательного осаждения атомов углерода происходит образование весьма плотного графита шва, соединяющего свариваемые детали. Для получения качественного сварного шва необходимо, чтобы разложение соединения происходило как можно ближе к поверхности деталей или непосредственно на ее поверхности.

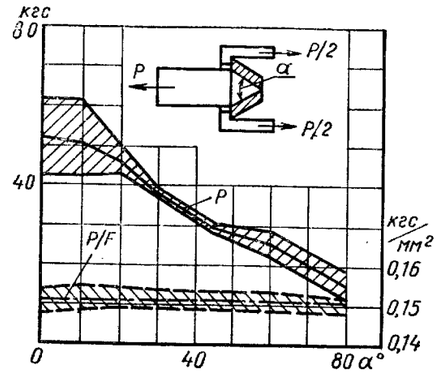


Рис. 11. Схема испытания и прочность сварных соединений графита. Диаметр стержня 10 мм

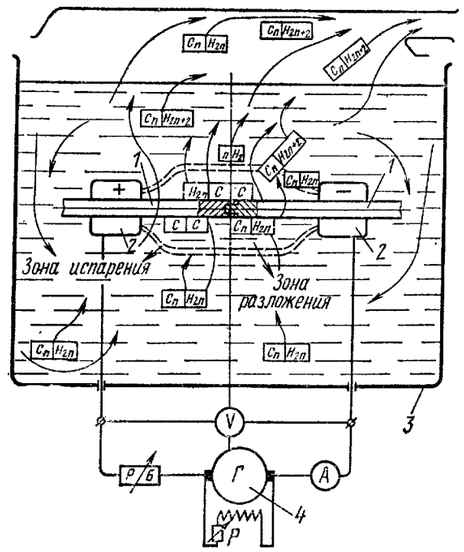


Рис. 12. Схема процесса сварки графита нагревом в минеральном масле

При этом возможно полное разложение соединения C_nH_{2n} с образованием атомов водорода или перестройка предельных углеводородов в непредельные. Химический анализ показал, что 60% отходящих газов составляют газы гомологического ряда метана и около 4% водород. В процессе сварки графита нагревом в жидких углеводородах происходит процесс полного разложения углеводородов по реакции

$$C_nH_{2n} \xrightarrow{\text{Нагрев}} \underset{\downarrow}{nC} + nH_2\uparrow$$

и процесс неполного разложения

$$C_nH_{2n} \xrightarrow{\text{Нагрев}} \underset{\downarrow}{C} + C_nH_{2n+2}\uparrow,$$

причем большую долю занимает второй процесс.

При сборке стержней и трубок без разделки кромок соединение осуществляется в основном за счет создания на поверхности детали слоя графита, прочно связанного с обеими частями детали. При этом графит сварного шва заполняет все наружные дефекты (раковины, трещины и т. д.) свариваемого материала. В тех случаях, когда сварку производят с предварительной разделкой кромок, происходит заполнение места разделки графитом сварного шва с образованием усиления в месте сварки, величину которого можно регулировать. При соответ-

ствующем выборе температуры нагрева и формы стыка можно осуществлять процесс сварки практически без усиления на наружной поверхности деталей.

Соединения можно также получить путем разложения масел в стыке соединяемых деталей. В этом случае состыкованные детали погружают в масло и выдерживают в течение 3—5 мин для пропитки графита и проникновения масла в зазор между свариваемыми деталями. Дальнейший нагрев пропитанных деталей сопровождается выделением графита на свариваемой поверхности, в стыке и порах свариваемых деталей. Такая технология позволяет почти полностью исключить образование усиления на поверхности деталей даже без разделки кромок.

Процесс получения графита разложением паров масла приводит к получению материала с высокой плотностью, не содержащего пор, и структурой, характерной для структуры пиролитического графита. При сварке по этой технологии площадь сечения деталей в месте соединения, как правило, меньше исходной площади сечения деталей, так как зазор между деталями заполняется не полностью. Электрическое сопротивление места сварки даже при продолжительности сварки 0,5 мин ниже электрического сопротивления целого стержня. Это объясняется тем, что формирующийся при разложении углеводородов графит сварного шва имеет удельное сопротивление в рабочем направлении на порядок ниже, чем графит, используемый в промышленности. Прочность сварного соединения повышается с увеличением продолжительности сварки и сварочного тока и при продолжительности сварки более 2 мин превышает прочность графита, используемого в промышленности.

Сварка графита с металлами. С помощью сварочной дуги в камерах с аргоном и электронного луча в вакууме можно сваривать активные, тугоплавкие и другие металлы с графитом. На образование соединений металла с графитом, так же как и при пайке металлов, влияют капиллярные, диффузионные и химические процессы, протекающие между жидким металлом и поверхностью твердого нагретого графита. Однако, в отличие от пайки металлов, при сварке металлов с графитом отсутствуют промежуточные припои, а процесс протекает в основном вследствие способности металла в расплавленном состоянии смачивать поверхность графита. При сварке электронным лучом создается наилучшее растекание металла при сплавлении с графитом. Нагрев дугой в аргоне обеспечивает несколько худшие результаты. На процесс сварки влияет присутствие газов в порах графита. При сварке в вакууме осуществляется дегазация и очистка поверхности не только металла, но и графита, что способствует лучшему проникновению металла в графит, что также обеспечивает лучшее соединение.

Возможна сварка с графитом следующих металлов: Ti, Zr, W, Nb, Ni, Mo, Ta, 12Х18Н10Т, Fe, АМг6 и др. Наилучшей смачиваемостью обладают Ti и Zr. В процессе смачивания свариваемые металлы глубоко проникают в поры графита. Проникновение металла в графит сопровождается образованием карбидов на границе раздела металл — графит. Расплавляясь, титан обволакивает тонким слоем графитовую деталь. В наплавке титана обнаруживаются карбиды титана, особенно крупные при аргонодуговой сварке титана с графитом.

Возможность получения карбидного слоя на поверхности графита в процессе наплавки металла в некоторых случаях является положительным фактором, так как наличие карбидного слоя на графите способствует увеличению жаропрочности сварного соединения. Если металл не сваривается с графитом непосредственно, как, например, медь, то сварку можно осуществлять через промежуточный металл.

Дуговая сварка и сварка электронным лучом могут быть использованы при изготовлении щеток электрических машин, анодов электролитических ванн, анодов ртутных выпрямителей и др.

СВАРКА ПЛАСТМАСС

Общие сведения о свариваемости. Сварка пластмасс является высокопроизводительным, надежным и экономичным процессом получения неразъемных соединений. Практически можно сваривать все термопласты. Характеристика многотонн-

нажных пластмасс, из которых изготовляют сварные конструкции, приведена в в табл. 15.

15. Свойства наиболее распространенных термопластов

Термопласт	Плотность, г/см³	$\sigma_р$ кгс/см²	$\sigma_т$ кгс/см²	Температура плавления, °С
Полиэтилен:				
высокого давления (ПЭВД)	0,918—0,935	120—160	90—100	105—108
низкого давления (ПЭНД) . .	0,945—0,955	220—250	220—260	120—125
Полипропилен (ПП)	0,9—0,91	250—400	250—350	160—170
Жесткий пластифицированный поливинилхлорид (ПВХ)	1,38—1,40	450—700	450	170—200
Полистирол	1,05—1,18	400—450	—	160—190
Полиамид	1,10	500—580	—	215—221

Термопласт	Удельная теплоемкость кал/(г·°С)	Относительное удлинение при разрыве, %	*НВ*	Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 10^6 Гц	Морозостойкость, °С
Полиэтилен:					
высокого давления (ПЭВД)	0,50—0,68	150—600	1,4—2,5	$(2 \div 3)\ 10^{-4}$	—70
низкого давления (ПЭНД) . .	0,55	400—800	4,5—5,8		—60
Полипропилен (ПП)	0,46	200—800	6,3	$(2 \div 5)\ 10^{-4}$	—15
Жесткий пластифицированный поливинилхлорид (ПВХ)	0,25—0,35	40—50	1—16	$(15 \div 18)\ 10^{-3}$	—10
Полистирол	0,32	1—2	14—20	$(2 \div 3)\ 10^{-4}$	—60
Полиамид	0,20	100—150	—	0,06	—60

Сварка пластмасс основана на взаимодействии макромолекул в зоне контакта свариваемых деталей. Это взаимодействие может быть двух типов. В одном случае оно обеспечивается процессом течения материала, находящегося в вязкотекучем состоянии, по поверхностям физического контакта. Образование сварного соединения такого типа сопровождается перемешиванием, аутогезией, диффузией и релаксацией. Интенсивность этих процессов зависит от вида материала, его вязкости в зоне сварки, от количества материала, находящегося в вязкотекучем состоянии, от скорости его течения (скорости сдвига), в свою очередь, определяемой давлением, прилагаемым к свариваемым деталям, а также от состояния их поверхности. При таком взаимодействии реализуются межмолекулярные силы Ван-дер-Ваальса. В другом случае взаимодействие макромолекул в зоне физического контакта свариваемых деталей определяется радикальным механизмом, т. е. сопровождается образованием химических связей.

В первом случае для взаимодействия между макромолекулами необходимо перевести материал в зоне сварки в вязкотекучее состояние — расплавить его; поэтому такой вид сварки называют сваркой плавлением. Во втором случае между взаимодействующими макромолекулами образуются химические связи; поэтому такой вид сварки называют химической.

Сварку плавлением применяют при соединении термопластов и эластотермопластов. Она основана на способности полимерных материалов при нагреве выше определенных температур или при набухании (при введении растворителя) переходить в вязкотекучее состояние, которое при приложении давления к соединяемым деталям способствует возникновению межмолекулярного взаимодействия. При этом в зоне контакта протекают реологические процессы (перемешивание расплава, его вытекание, ориентация и др.), которые определяют качество сварного соединения.

Основными параметрами режима сварки являются температура и время нагрева свариваемых деталей, а также давление при сварке и время его приложения. Реакция исходного материала на термомеханический цикл сварки различна. Структура сварного шва отличается от структуры основного материала, что может влиять на эксплуатационные свойства сварной конструкции при работе в агрессивной среде, при знакопеременных нагрузках и т. д. При нагреве ориентированных полимеров до температуры плавления ориентация теряется и первоначальные механические свойства изменяются. К ухудшению механических свойств может привести сварка при температурах, близких к температуре деструкции. Долговечность изделия может уменьшиться вследствие испарения стабилизатора или его вымывания растворителем в зоне шва.

В процессе сварки под действием нагрева, прилагаемых усилий осадки и охлаждения в шве и околошовной зоне возникают местные напряжения и могут образоваться микроскопические трещины. Поэтому сварные швы нерационально подвергать нагрузкам сразу после сварки. Однако, спустя некоторое время, обычно через 8—20 ч, собственные напряжения снижаются вследствие релаксации. Процесс релаксации может быть ускорен путем термической обработки стыка.

Химическую сварку применяют для соединения отвержденных реактопластов, термопластов с поперечными связями и некоторых термопластов кристаллической и ориентированной структуры. В основе химической сварки лежит процесс образования химических связей между макромолекулами. Она может быть осуществлена за счет функциональных групп свариваемых полимеров или с помощью мостикообразующих веществ, вводимых в сварной шов. Например, дополнительным нагревом до температур, превышающих температуру отверждения, обеспечивается инициирование химических связей реакционноспособных групп макромолекул в зоне контакта поверхностных слоев деталей из реактопластов на основе фенолоформальдегидных, анилиноформальдегидных и других смол. Присадку в виде резольной смолы добавляют при сварке пластмасс на основе эпоксидных полимеров. Сшитый ПВХ сваривают с присадкой диаминов, наносимых в растворителях.

Химическая сварка эффективна при соединении ориентированных термопластичных пленок и волокон, от сварных швов которых требуется сохранение исходных физико-механических свойств основного материала. При соединении, например, полиамидных пленок в качестве присадочных реагентов используют многоосновные кислоты и их хлорангидриды, а при соединении полиэтилентерафталатной пленки — ангидриды многоосновных кислот или органические перекиси, наносимые на свариваемые поверхности из раствора в кетоне или в смеси с низкомолекулярным полиэфиром — из раствора в полиметиленхлориде. Химическая сварка — сшивка может быть выполнена и без присадки при нейтронном или рентгеновском излучении.

Способы сварки пластмасс. В основу классификации способов сварки положен способ термического воздействия на свариваемые детали (рис. 13).

Сварка газовым теплоносителем — способ, при котором тепло на свариваемые поверхности подается нагретой струей газа. Сварку газовым теплоносителем можно производить без присадки либо с присадочным материалом в виде круглого прутка диаметром 2—6 мм или прутка другого сечения, а при сварке пленок — в виде ленты шириной 10—15 мм. Присадочный материал содержит 3—10% пластификатора. Жесткие пластики толщиной менее 2 мм можно сваривать без разделки и без зазора. Пластики больших толщин сваривают с разделкой кромок, угол раскрытия которых 45—70° при зазоре 0,5—1,5 мм. Листы и трубы толщиной 4 мм и более сваривают с присадочным прутком за несколько проходов (несколькими слоями).

Сварку с помощью газового теплоносителя без присадочного материала применяют преимущественно при нахлесточных соединениях пленок и листов из мягких термопластов. Скорость механизированной сварки таким способом листов из поливинилхлорида 15—20 м/ч. В качестве газа-теплоносителя чаще используют воздух. Можно применять азот, углекислый газ или аргон. Температура

газовой струи на выходе из сопла должна превышать температуру перехода пластмассы в вязкотекучее состояние на 50—100° С (табл. 16). Давление газовой струи составляет 0,4—0,9 кгс/см² в зависимости от скорости сварки. Скорость сварки однослойного шва 9—15 м/ч. Усилие на пруток 0,8—1,5 кгс для полиамидов и полиолефинов и 1,5—2 кгс для жесткого ПВХ. Мягкий пруток дополнительно прикатывается роликом с усилием 1,5—3 кгс.

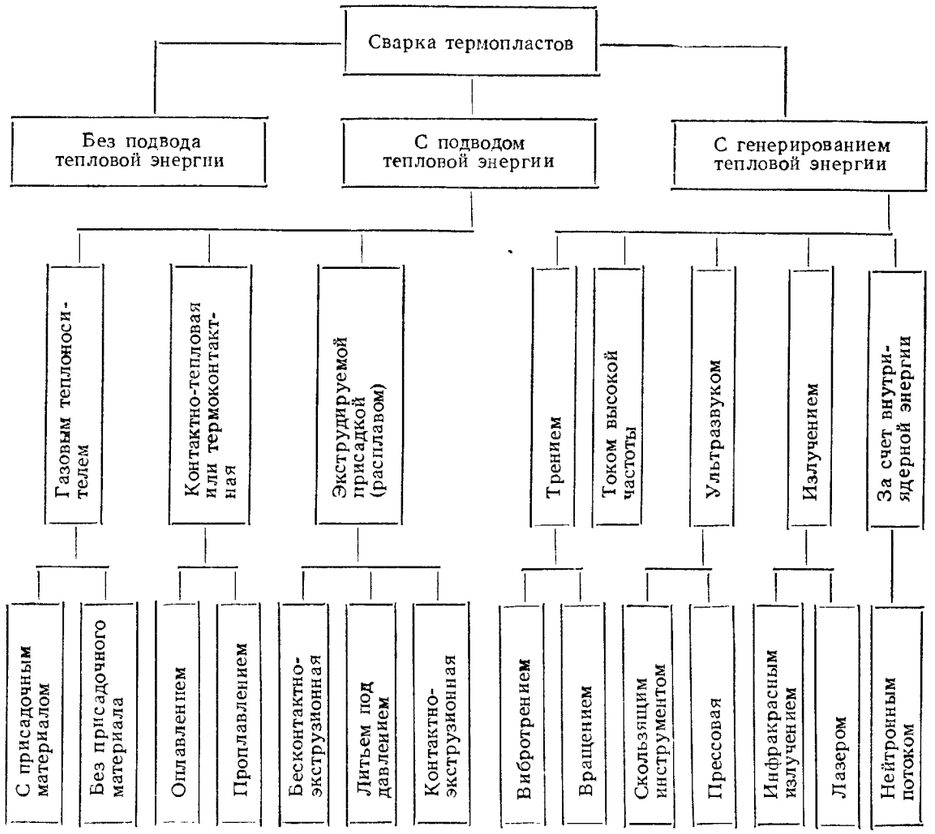


Рис. 13. Классификация способов сварки пластмасс

Для повышения производительности применяют сдвоенный сварочный пруток, прутки треугольного или квадратного сечений по площади, близкой площади сечения разделки. Эффективно использовать предварительный нагрев прутка и места разделки. Применяя специальный наконечник горелки, имеющий два сопла (для подачи прутка и горячего воздуха), можно увеличить скорость сварки.

При сварке пластмассовых конструкций газом с присадочным материалом возникают напряжения и деформации в шве и околошовной зоне. Многие технологические приемы их снижения (симметричное поочередное наложение слоев и др.) при дуговой сварке металлов можно эффективно использовать и при сварке пластмасс.

Для сварки нагретым газом с присадочным материалом применяют сварочные горелки, а также горелки с электрическим нагревом газовой струи, например ГЭП-1-67 (рис. 14), и нагревом газосгорающими смесями, так называемые

горелки косвенного действия типа ГГК-1 и горелки прямого действия типа ГГП-1 (табл. 17). Для сварки прямолинейных швов в нижнем положении разработаны сварочные тракторы ПГП-1 и «Пчелка» (табл. 18).

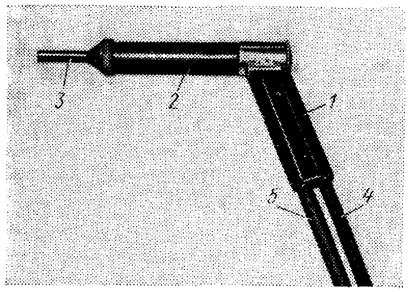


Рис. 14. Горелка для сварки пластмасс с электрическим нагревом газового теплоносителя:

1 — рукоятка; *2* — корпус с нагревателем; *3* — сменное сопло; *4* — токоподводящий кабель; *5* — воздухопровод

16. Температура струи газа и его расход при сварке с присадочным материалом

Термопласт	Расход газа, л/мин	Температура струи газа на выходе из сопла, °С
Винипласт	40	270—310
Ударопрочный:		
ПВХ	30—40	280
полистирол	40	210—290
Полиэтилен:		
ВП	65	325
НП	80	210
Полипропилен	35	300
Полибутен	30	480
Полиамид-12	18	330—400
Полиметилметакрилат	40	220—380

Прочность сварных соединений винипласта, выполненных газовым теплоносителем с присадочным материалом, составляет 0,4—0,6 от прочности основного материала, 0,3—0,4 для полиметилметакрилата, 0,4—0,5 для полистирола.

17. Техническая характеристика сварочных горелок (диаметр присадочного материала 3—5 мм)

Параметр	ГГП-1*	ГГК-1	ГЭП-1Б-67**
Газ-теплоноситель	Продукт горения	Любой	
Рабочее давление газа-теплоносителя, кгс/см²	0,1—1,0	0,15—1,0	До 0,5
Расход, м³/ч:			
пропана	25—40	0,120	3—5
природного газа	30—120	0,360	
Масса, кг	0,6	—	0,68

* Габариты 260×70×85 мм.
** Рабочее напряжение на спирали 36 В, мощность 0,5 кВт.

18. Техническая характеристика сварочных тракторов

Параметр	ПГП-1	«Пчелка»
Напряжение, В:		
сети	220	
нагревательной горелки	36, 30, 24	—
мотора тележки	24	—
Мощность, Вт	До 750	1200
Максимальная толщина свариваемого материала, мм	4	—
Скорость сварки треугольным прутком, м/ч	До 60	До 100
Минимальное давление воздуха, кгс/см²	0,5	—
Максимальная температура воздуха, °С	300	
Масса, кг:		
полуавтомата	14	—
блока питания	30,5	—
Габаритные размеры, мм	190×310×500	—

Контактную сварку или сварку нагретым инструментом подразделяют на сварку оплавлением и сварку проплавлением. В первом случае нагреватель соприкасается непосредственно со свариваемыми поверхностями, во втором случае тепло к свариваемым поверхностям поступает сквозь толщу деталей,

а нагретый инструмент контактирует с поверхностью свариваемых деталей. Первый способ используют для сварки деталей значительной толщины, второй способ — для сварки тонких листов и пленок внахлестку. При этом используют различные схемы нагрева свариваемых деталей (рис. 15). Нагретые инструменты могут быть в виде пластин, полос, дисков, нитей и профилированных планок.

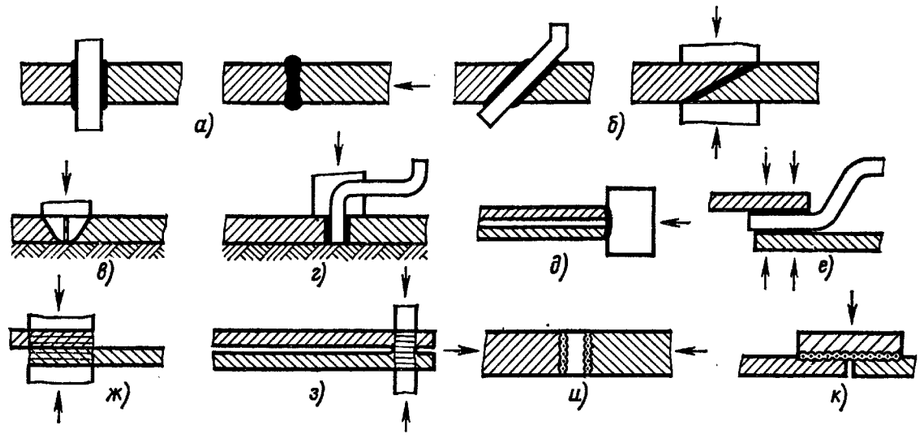


Рис. 15. Основные схемы контактной сварки:

а—е — оплавлением; *ж* и *з* — проплавлением; *и* и *к* — закладным нагревательным элементом

Режим сварки некоторых термопластов приведен в табл. 19. Указанное в таблице давление нагретого инструмента является начальным, и по мере оплавления неровностей на кромках свариваемого материала оно должно снижаться, чтобы уменьшить вытекающий из зоны контакта расплав (рис. 16). После нагрева

19. Основные параметры режима контактной сварки пластмасс оплавлением

Термопласт	Температура нагрева инструмента, °С	Давление, кгс/см²		Время нагрева, с
		нагрева (начальное)	осадки	
Полиэтилен:				
ВП	240±10	0,2—0,5	1,5—3,0	30—180
НП	190—220	0,3—0,4	1,5—2,0	30—80
Винипласт	230—250	3,0—4,0	5,0—9,0	40—60
Пластифицированный ПВХ	180—200	0,1—0,3	1,0—1,5	20—60
Полипропилен	190—240	0,3—0,4	1,5—2,0	30—120
Поливинилацеталь	220	0,1—0,2	~1	10—40

и осадки охлаждение по всей свариваемой площади должно происходить равномерно, под постоянным давлением.

Трубы диаметром более 50 мм соединяют встык, трубы диаметром менее 50 мм при толщине стенки менее 2 мм сваривают враструб. При стыковой сварке торцы труб нагревают плоским инструментом, имеющим форму диска (табл. 20) для нагрева труб малого диаметра и форму кольца для нагрева труб большого диаметра. Нагрев этих инструментов в зависимости от конструкции можно осуществлять встроенными электронагревателями либо газовыми горелками.

При сварке винипласта применяют нагретые инструменты, имеющие ребристую поверхность; высота и шаг пилообразных ребер 0,5—1,5 мм. Ориентировочные параметры режима стыковой сварки труб приведены в табл. 21.

Производительность трубосварочных установок (рис. 17) при сварке труб диаметром 100—200 мм пять-семь стыков в час.

При сварке враструб нагревательный инструмент имеет гильзу для оплавления конца трубы и дорн для оплавления внутренней поверхности раструба.

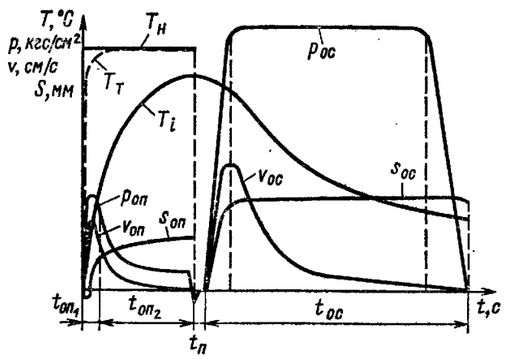


Рис. 16. Изменение основных параметров режима при контактной сварке оплавлением:

$T_н$, $T_т$, T_i — соответственно температуры нагревателя, торца (нагреваемой кромки) и в зоне плавления; $P_{оп}$, $P_{ос}$ — давление инструмента при оплавлении и осадке; $v_{оп}$ и $v_{сс}$ — скорости оплавления и осадки; $s_{оп}$, $s_{ос}$ — укорочения изделия при оплавлении и осадке; $t_{оп}$, $t_п$, $t_{ос}$ — время оплавления, технологической паузы и осадки

20. Характеристика серийных дисковых нагревателей для контактной сварки труб оплавлением

Максимальный диаметр свариваемых труб, мм	Мощность, кВ	Рабочее напряжение, В	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
110	0,45	36	165×280	1,3
160	1,0	220	210×170	2,0
225	1,6	36	360×280	5,4

Примечание. Диапазон регулирования температуры нагрева 20—250 °С.

Дорн и раструб могут иметь цилиндрическую или слегка коническую поверхность (конусность $^1/_{16}$—$^1/_{12}$). Разность диаметров гильзы и дорна у цилиндрического инструмента должна быть 0,5—1 мм. Режим сварки враструб приведен в табл. 22.

21. Технологические параметры контактной стыковой сварки оплавлением труб диаметром 100—300 мм

Материал труб	Толщина стенки, мм	Давление, кгс/см²		Время нагрева, с	Температура нагревателя, °С	Пауза, с	Время охлаждения стыка, мин, при температуре окружающей среды, °С			
		при оплавлении	осадки				−20	0	+20	+40
Полиэтилен плотности:										
высокой	2—6	0,2—0,3	1,2—1,3	45	250±10	8	3	4	4	5
	7—10	0,4—0,5	1,4—1,6	55			5	6	8	10
	11—15	0,6	1,8—2,0	65			8	10	11	12
низкой	2—6	0,2—0,3	1,2—1,3	35	200±10	5	3	4	4	5
	7—12	0,4—0,5	1,4—1,7	50			5	6	8	10
Полипропилен	2,5—5	0,3	1,2	45	240±10	6	3	4	4	5
	6,0—8,5	0,4	1,4	55			5	6	8	10

При использовании закладного нагревателя нагрев и оплавление в зоне контакта собранных полностью деталей производится при пропускании тока по металлическому проводнику (проволоке, ленте), который закладывается в зону контакта свариваемых деталей при сборке. Усилие в зоне плавления, необходимое для сварки, создается вследствие расширения расплавляемого материала. Например, для сварки закладным нагревателем труб диаметром 25—110 мм создано переносное устройство, питающееся от сети переменного тока напряжением 220 В. Потребляемая мощность 750 Вт, ток до 30 А, регулирование рабочего напряжения на закладной спирали 5—28 В, время нагрева можно варьировать в диапазоне 20—400 с. Размеры установки 450 × 250 × 260 мм при массе 20 кг.

22. Основные технологические параметры контактной сварки труб враструб

Параметр	Полиэтилен	
	низкой плотности, цилиндрический раструб	высокой плотности, конусный раструб
Температура сварки, °С	± 300—20	250—270
Время оплавления, с, при толщине стенки, мм:		
до 4	5—10	7—12
» 5	6—15	10—15
» 8	8—18	15—20
св. 8	10—20	—

Примечание. Время выдержки под осевой нагрузкой до частичного отверждения оплавленного материала 5—15 с, время между снятием инструмента и осадкой — не более 2 с.

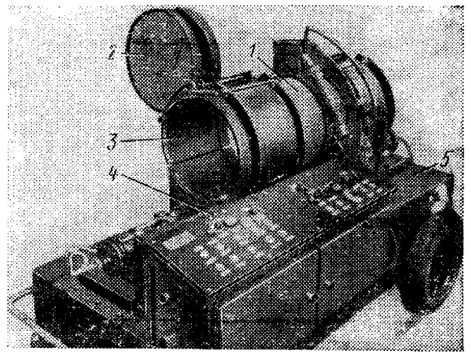


Рис. 17. Общий вид полуавтоматической установки для контактной сварки пластмассовых труб диаметром до 320 мм (конструкция ВНИИСТ);

1 — дисковый нагреватель; *2* — фреза для механической обработки кромок; *3* — наружные захваты — центраторы; *4* — пульт управления; *5* — корпус

При контактной сварке проплавлением кромки пленок или листов можно нагревать с одной стороны или одновременно с двух сторон. При двустороннем нагреве скорость сварки увеличивают. Пленки и листы толщиной не более 2—3 мм сваривают проплавлением с получением нахлесточного соединения. При сварке пленок давление инструмента 5—15 кгс/см². Поэтому сварку производят на прессах, снабженных нагревательными элементами сопротивления — стальными лентами, нитями либо плитами с встроенными ТЭНами (трубчатыми теплоэлектронагревательными элементами). Равномерное давление по длине рабочей части нагревателя обеспечивается применением эластичных и упругих подкладок, располагаемых под нагревателем.

Для непрерывной сварки неармированных пленок можно применять роликовые инструменты, которые используют при ручной сварке. Для полуавтоматической сварки созданы сварочные полуавтоматы ленточного типа. Между непрерывно перемещающимися навстречу друг другу лентами зажимаются и свариваются пленки. В полуавтомате ПСП-15 применен двусторонний контактный нагрев. Две замкнутые металлические ленты, натянутые на четыре ролика и приводимые в движение электродвигателем, перемещают свариваемый материал последовательно между двумя нагревателями и двумя гребенчатыми охладителями. Необходимое давление осуществляют тарированными пружинами. Скорость сварки плавно регулируют в пределах 2—5 м/мин. Режим контактой сварки некоторых термопластичных пленок приведен в табл. 23.

Для сварки пленок толщиной менее 100 мкм используют термоимпульсную сварку — разновидность контактной сварки проплавлением. В этом случае нагревательный элемент, имеющий малую теплоемкость, получает кратковременный импульс тока. Проплавление происходит за счет выделившегося тепла, а охлаждение шва — за счет теплоотвода в подложку или в тело электрододержателя. Термоимпульсной сваркой соединяют тонкие пленки из полиолефинов, полиамидов и др.

23. Режимы контактной сварки пленки

Материал пленки	Толщина мкм	Температура инструмента, °С	Давление, кгс/см²	Выдержка, с
Полиэтилен плотности: низкой	45—80	130—140	0,5—0,6	2—3
	60—90	140—160		
	150—200	160—180		3—5
	300—500			5—10
	600—800			
высокой	60—150	200—220	0,6—0,8	2—3
		230—240	До 1,0	
ПВП	150—300	160—170	0,8—0,9	
Полипропилен	60—150	230—240	До 1,0	
	150—300	180—200	0,9	
Полиамид	60—150	185—200	0,6—0,8	5—6
	130—200	210—220	0,4—0,5	10—15
Сополимер этилена с пропиленом СЭП-10	60—150	200—220	0,6—0,8	2—3
	150—300	160—170	0,8—0,9	
Фторопласт-4	100—200	390—400	0,2—0,5	120—180

Армированные пленки сваривают с получением нахлесточного соединения (рис. 18). Для изготовления сварных оболочковых конструкций из армированных пленок применяют стационарные консольные и портальные сварочные прессы. В качестве нагревателя на этих прессах служат ленты толщиной 0,5—0,8 мм из коррозионно-стойкой или жаропрочной стали, располагаемые на гидравлической подушке. Малоинерционные нагревательные элементы позволяют производить сварку практически с любым термическим циклом, от импульсного при сварке пленок малых толщин до длительного при сварке толстых и резинонаполненных пленок. Для сварки пленок в монтажных условиях применяют переносные прессы (струбцины).

Капсукский завод продовольственных автоматов им 50-летия СССР выпускает установки М6-АП-2С для термоимпульсной сварки пленок, имеющих ножной привод. Машину поставляют со сменными рабочими органами — нагревательными элементами (проволока для сварки и одновременной резки и планки с ленточным нагревателем). Серийно выпускают автоматы М6-АБО для сварки из пленок обложек и М6-ФУГ для упаковки продуктов.

Сварку коротких швов единичных изделий можно выполнять ручными клещами, позволяющими получать за цикл шов длиной 100—200 мм.

Техническая характеристика установки М6-АП-2С

Производительность при сварке, циклов/ч:	
проволокой	300—400
лентой	350
Максимальные размеры шва за цикл, мм:	
длина	500
толщина	250
Время нагрева, с	1—6
Напряжение на нагревателе, В	0—36
Габаритные размеры, мм	1020×720×800
Масса, кг	75

Сварку экструдируемой присадкой производят при непрерывной подаче расплавленного присадочного материала между соединяемыми поверхностями.

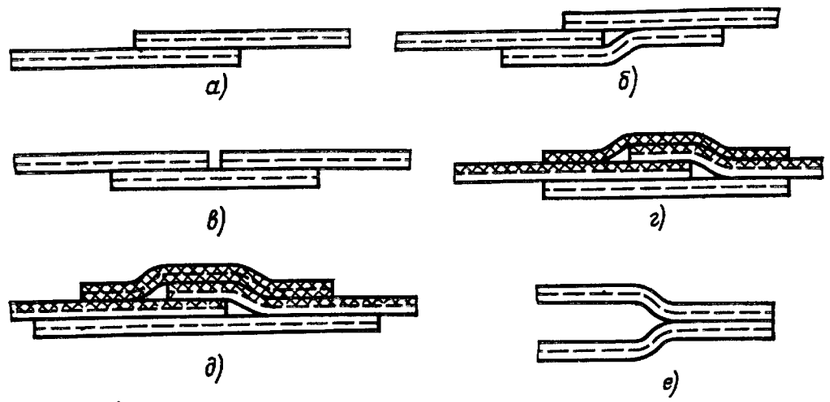


Рис. 18. Типы сварных соединений армированных пленок:

а — нахлесточное; *б* — *д* — с накладками; *е* — рантовое (Т-образное)

Ее можно выполнять по трем схемам. При сварке открытой струей присадочный материал непрерывно поступает в зону соединения из сопла экструдера, находящегося на некотором расстоянии. При контактно-экструзионной сварке нагретое сопло может касаться свариваемых кромок, добавочно нагревая их. В третьем случае расплав подается в зону соединения из литьевой машины периодически. Таким способом соединяют заранее отштампованные скорлупы и сварку их производят в собранном виде, в форме, которая имеет специальные каналы, расположенные вдоль линии разъема. По этим каналам продавливается расплав. При передаче части тепла расплава детали плавятся и соединяются по линии разъема. Этот способ сварки целесообразно использовать для соединения пластмасс, имеющих сравнительно невысокую температуру перехода в вязкотекучее состояние (полиэтилен, полипропилен, пластифицированный поливинилхлорид, полистирол и др.).

В первых двух случаях экструдированной присадкой можно получать стыковое, нахлесточное и угловое соединения. При стыковой сварке можно применять V-образную и X-образную разделки. При сварке полиолефинов угол раскрытия кромок следует выдерживать 70—100° при V-образной разделке, 60—80° при X-образной разделке. Зазор должен быть 0,5—1,5 мм. Температура присадочного материала 220—280° С. Диаметр струи расплава 3—4 мм.

Прочность сварного соединения увеличивается при сопутствующей прикатке формируемого шва роликом. Давление ролика в этом случае должно быть 1—3 кгс/см².

Для экструзионной сварки применяют полуавтомат ПСП-5. Он имеет ручной пистолет массой 1,5 кг, подсоединенный к переносному пульту электрическим кабелем. Пистолет работает по принципу выдавливания плавящегося конца присадочного прутка, непрерывно толкаемого холодной частью прутка. Пистолет нагревается электроспиралью. К корпусу пистолета прикреплена катушка с присадочным прутком, который подается с помощью роликов. Ролики приводятся в движение электродвигателем, расположенным в рукоятке пистолета. Производительность полуавтомата ПСП-5 0,28 кг/ч.

Для сварки стыков футеровки из полиолифиновых листов толщиной не менее 0,6 мм создано сварочное устройство РЭСУ-500. В комплект РЭСУ-500 входит экструзионный сварочный пистолет прямоточного типа с приспособлением для дополнительного нагрева кромок свариваемых материалов газообразным теплоносителем, пульт управления, электрический кабель и гибкий резиновый шланг для подвода газа — теплоносителя.

В качестве присадочного материала применяют пруток круглого сечения диаметром 4 мм из того же материала, который подвергают сварке. Скорость сварки полиэтиленовых листов толщиной 1,3—2 мм составляет 30—40 м/ч. Масса пистолета 1,5 кг. Создана полуавтоматическая установка ПЭСУ-2000, в состав которой входит сварочный трактор и пульт управления. В качестве присадочного материала для сварки применяют гранулированный полимерный материал. Скорость сварки листового материала толщиной 1,5—2 мм составляет 100—120 м/ч.

Сварка трением. Различают три схемы процесса сварки пластмасс трением: вращением свариваемых деталей или вставки между ними; вибрацией свариваемых деталей или промежуточного элемента и комбинацией этих двух схем.

Перед сваркой вращением массивных деталей соединяемые поверхности должны быть обработаны таким образом, чтобы они имели или сферическую, или коническую форму. Скорость перемещения деталей относительно друг друга зависит от геометрических размеров свариваемых поверхностей и составляет 80—200 м/мин. Давление при трении составляет 1—15 кгс/см², время от начала контакта до окончания вращения 3—25 с. После остановки сваренный стык должен остывать под осевым давлением не менее 5—8 мин. При сварке вибротрением свариваемым деталям, находящимся в плотном контакте, сообщается относительное возвратно-поступательное движение низкой частоты (50—400 Гц) с определенной амплитудой (1—2 мм) при давлении 15—150 кгс/см². Сваркой трением соединяют термопласты, вязкость которых при температурах перехода в вязкотекучее состояние меняется плавно. Это полиолефины, поливинилхлорид жесткий, полиацетали, акриловое стекло, полистирол и сополимеры стирола.

При сварке пластмасс ТВЧ тепловыделение в свариваемой зоне обусловлено в основном током поляризации, возникающим за счет смещения в ограниченных пределах звеньев макромолекул вследствие дипольного эффекта. Поэтому в поле ТВЧ нагревают только полярные пластмассы.

Способность пластмасс к нагреву в поле ТВЧ характеризуется фактором диэлектрических потерь: чем он выше, тем интенсивнее нагрев. Интенсивность теплообразования при высокочастотной сварке может быть повышена увеличением частоты либо напряжения тока. Однако, во избежание пробоя свариваемого пакета, напряжение на конденсаторе не должно превышать 60—70% пробивного напряжения материала. Частота тока определяется характеристикой генератора и физическими характеристиками свариваемого материала. Чем меньше фактор диэлектрических потерь пластмассы, тем выше должна быть частота тока.

При сварке пленок для уменьшения интенсивности теплоотвода в электроды применяют прокладки из термоизоляционного материала, например прессшпана. Продолжительность сварки зависит от длины свариваемого шва и толщины пакета. При толщине пленки из пластифицированного ПХВ 0,1; 0,3; 1,0 мм площадь шва 20, 25 и 50 см²; на их сварку необходимо 3—12 с; давление 1—5 кгс/см². Сварку пленки совмещают с обрезкой готовых деталей. Для этой цели применяют электроды, имеющие режущую кромку специальной формы.

Поперечные стыки труб из винипласта при толщине стенок не более 6—8 мм сваривают с помощью ТВЧ на частотах 40—75 МГц путем нагрева кольцевыми индукторами. При сварке ТВЧ материалов из полиамидов термомеханический режим необходимо выдерживать в узких пределах. Интервал вязкотекучего состояния полиамидов 3—5° С. Расширение температурного диапазона сварки достигается добавкой в зону шва пластификатора, например трикрезола.

Для сварки ТВЧ в стационарных условиях используют прессы с ручным пневматическим или гидравлическим приводом. Устройства для сварки ТВЧ обеспечивают работу с ограничителем по зазору между электродами к концу цикла сварки либо постоянное давление на протяжении всего цикла. Имеются сварочные машины, у которых давление изменяется по определенной программе в зависимости от термического цикла.

Основные технические характеристики отечественных сварочных устройств приведены в табл. 24.

24. Технические характеристики некоторых высокочастотных установок [1]

Параметры	ВЧД3-1,6/27	ВЧД4-1,6/27	ВЧД9-4/27	ВЧД10-4/27	ВЧД6-10/27	ВЧД2-25/27
Мощность, кВт:						
потребляемая	4,1	4,1	7,7	7,7	21	38
колебательная	1,6	1,6	4±0,4	4±0,4	10	25±2,5
Напряжение питающей сети, В	380/220	380/220	380	380	380	380
Усилие пресса, при сварке, кгс	300	50—500	200—1500	50—500	10 000	10 000
Размеры рабочей плиты, мм	200×300	500×600	500×600	500×600	1200×1600	—
Расстояние между плитами рабочего конденсатора, мм	25—75	25—50	20—250	25—50	50—100	50—150
Длина сварного шва при ширине 2 мм и толщине материала 2×0,3 мм, мм	3000	3000	—	—	10 000	20 000
Производительность сварок/ч	120	300	300	300	180	180
Габаритные размеры, мм	1565×2160×900	—	1700×2000×2100	1700×1700×1500	4000×4200×1970	—
Масса, кг	530	—	1730	1000	2500	—

[1] Рабочая частота 27,12±0,27 МГц; число фаз 3.

Область применения высокочастотной сварки можно расширить путем повышения частоты электрического поля до сверхвысоких частот (СВЧ около 2000—3000 МГц). С помощью СВЧ можно сваривать пленки из фторопластов Ф-2М, Ф-3Б, Ф-30, Ф-40, Ф-40ЛД, Ф-42, Ф-4НА.

Сварочные установки для сварки СВЧ имеют генератор на основе магнетронов (например, М-57) мощностью 2,5—5 кВт и сварочное устройство. Протяжной механизм устройства служит для перемещения свариваемой пленки со скоростью 0,3—0,8 м/мин. Два электрода устройства расположены на станине. Один из электродов является плитой на регулируемых пружинах, обеспечивающих сварочное давление, а второй — штоком, подключаемым к волноводу от генератора. Сварку ведут с антиадгезионными прокладками. Механические характеристики сварных швов, выполненных СВЧ, приведены в табл. 25.

Сварку пластмасс ультразвуком (УЗ) производят на частотах 20—50 кГц. Для большинства пластмасс оптимальная амплитуда смещения конца волно-

вода 30—40 мкм. С помощью давления волновода на свариваемые детали обеспечивается не только акустический контакт, но и формирование сварного соединения. Время сварки (время пропускания ультразвука) также влияет на прочность сварных соединений. КПД ультразвуковой установки повышается, если к магнитострикторy подсоединяют два трансформатора с волноводами.

25. Прочность сварных соединений пластмасс, полученных разными методами

Пластмасса	Диэлектрические свойства при частоте 10^3 Гц		СВЧ						Термоимпульсный		
			Время сварки, с	Прочность сварных соединений, % к основному материалу		Время сварки, с	Прочность сварных соединений, % к основному материалу		Время сварки, с	Прочность сварных соединений, % к основному материалу	
	tg δ	ε		$\sigma_р$	$\sigma_{сд}$		$\sigma_р$	$\sigma_{сд}$		$\sigma_р$	$\sigma_{сд}$
Ф-2М	0,17	—		57	71	3—5	60	65	30—50	45—60	60—75
Ф-3Б	0,0035			45	80	—	Не сваривается	—	80—160	45—60	70—75
Ф-30	0,002	2,7		51	80	—	То же	—	20	40—45	45—50
Ф-40	0,003	2,5	1	52	96	—	»	—	20—30	50—55	85—90
Ф-40ЛД	0,015	—		40	95	—	»	—	30	55—60	75—80
Ф-42	0,2	11,3		48	75	30	15—20	50	120	40—45	—
Ф-4НА	0,021	7,7		63	100	—	Не сваривается	—	50—120	40—60	85—90

Примечание. При СВЧ мощность, подаваемая на сварочное устройство, не превышала 500 Вт; $\sigma_р$ — прочность при расслаивании; $\sigma_{сд}$ — прочность при сдвиге.

Различают три группы пластмасс, каждую из которых характеризует коэффициент затухания УЗ-колебаний. К первой группе относятся пластмассы с малым коэффициентом затухания $\beta = 0{,}35$ см$^{-1}$ — полистирол, оргстекло, сополимеры СНП, СН-28 и др., т. е. пластмассы, обладающие высокой жесткостью ($E > 3 \cdot 10^4$ кгс/см^2) и хорошо проводящие ультразвуковые волны, вследствие чего сварные соединения могут образовываться вдали от волновода.

Ко второй группе относятся полужесткие термопласты ($2 \cdot 10^4$ кгс/см^2 $< E < 3 \cdot 10^4$ кгс/см^2) — полипропилен, полиэтилентерефталат, аминопласты, поликарбонаты и другие, коэффициент затухания у_которых 0,35 см$^{-1}$ $< \beta <$ 0,55 см$^{-1}$.

К третьей группе относятся мягкие пластмассы ($E < 1{,}5 \cdot 10^4$ кгс/см^2), коэффициент затухания которых $\beta > 0{,}55$ см$^{-1}$. Это полиэтилен высокой и низкой плотности, поликапроамид (капрон), фторопласт, пластифицированный поливинилхлорид и др. Последние в значительной степени рассеивают УЗ-энергию, поэтому их можно сваривать в виде листов и пленок толщиной не более 1—2 мм. Мягкие термопласты можно сваривать только прессовым методом. С помощью контактной прессовой УЗ-сварки получают точечные, прямолинейные и замкнутые швы различного контура в зависимости от конфигурации волновода. Оптимальный диаметр точки 10 мм, а длина прямолинейных швов, полученных за один шаг, 240 мм. Максимальный периметр в случае квадратного или фигурного электрода 200—340 мм. При сварке деталей из пленки и синтетических тканей можно получать непрерывные швы за счет перемещения волновода или свариваемой детали. При сварке пленок повышенной толщины, во избежание продавливания пленки, сварку ведут с фиксированным зазором.

Оптимальный режим УЗ-сварки жестких термопластов (полистирола, полиметилметакрилата и др.): амплитуда смещения конца волновода 25—30 мкм; сила прижатия 15—20 кгс; продолжительность сварки 2 с. Режимы УЗ-сварки

пластмассовой пленки, а также ткани приведены в табл. 26 и 27. Прочность при УЗ-сварке во многих случаях выше, чем при термоимпульсной. Характеристики некоторых устройств для УЗ-сварки приведены в табл. 28.

26. Режим УЗ-сварки некоторых пленок и прочность швов

Свариваемый материал, толщина	Скорость сварки, м/с	Амплитуда смещения, мкм	Сила прижима ($S_к$ = = 8,0 мм^2)	Относительная прочность на раздир, % от прочности основного материала при сварке	
				ультразвуковой	термоимпульсной
Полипропилен, 30 мкм	0,088	30	0,5	57	45
Полиамид ПК-4, 60 мкм	0,03—0,05	30—40	0,8	32	8
Полиэтилен + целлофан, 60 мкм	0,03	30—40	0,8	80	73
Бумага + полиэтилен, 250 + + 150 мкм	0,02	40	0,4	13	10
	0,03—0,05	30	1,5	30—35	27
Полиэтилентерефталат, 20 мкм	0,05	30	0,5	12—18	Не сваривается

Примечание. $S_к$ — площадь контакта.

27. Основные рекомендации по ультразвуковой сварке капроновой, лавсановой и полипропиленовой тканей

Толщина ткани, мкм	Сварка	Характеристика источника питания	Сварочная установка	Основные параметры режима сварки		
				A, мкм	P, кгс	v, м/ч
80—150	Ручная	80 Вт	РУСУ-28	30—40	1,5	35—55
	Шовная и шовно-шаговая	ГУФ 28/40; 100 Вт	УПШ-12, головка СГ-12	30—40	0,6—0,8	20—30
		УЗМ-1,5; УЗГ6-1,6; 1—2 кВт	УПШ-12, УАП-11, никелевый преобразователь	25—30	1,8—2,0	200—300
200—450	Шовная	ГУФ 28/40; 100 Вт	УПШ-12	40	<0,6	21—25
		УЗМ-1,5; УЗГ6-1,6; 1—2 кВт		30—35	2,0—2,5	200—250
400—1000		ГУФ 28/40; 100 Вт		40—45	<0,6	15—20
		УЗМ-1,5; УЗГ6-1,6; 1—2 кВт		30—35	2,5—3,0	100—150

Примечание. A — амплитуда колебаний; P — усилие при сварке; v — скорость сварки.

28. Технические характеристики некоторых отечественных устройств для УЗ-сварки (при расходе воды 2 л)

Марка установки	Привод	Продолжительность сварки детали, с, или скорость	Максимальная толщина свариваемого пакета, мкм	Сварочное усилие, кгс	Мощность преобразователя, кВт	Частота преобразователя, кГц	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
УП-20	Ручной	0,5—5	100	0÷50	1,6	19,6	520×520×1200	85
УПТ-14	Пневматический	0,8—8	0,6÷0,6	5—200	1,2	19,6	540×1100×1200	260
УПК-15М1	Механический	0,05—16	0,4—1,5	1—70	2—3	19,0	655×945×1400	200
МТУ-0,4	Пневматический	~ 1,0	—	6—60	0,4	22,0	1300×600×1200	130
АУС-1,5	Пневмоэлектрический и электрический	~ 1,0	—	45	1,5	22,0	1640×990×540	190
УПШ-12 шовная	Механический	500—600 м/ч	200—1000	0—30	0,4	22,0	500×800×480	32
УПШ-19	»	100—600 м/ч	60—100	0—30	0,9	19,5	800×500×1350	80
РУСУ-28	Ручной пистолет	60 м/ч	200	0—15	0,080	28,0	320×245×165	8
РУСУ-50	То же	60 м/ч	20	0—10	0,02	50,0	250×220×150	5

Сварку излучением производят путем нагрева соединяемых кромок инфракрасными (ИК) лучами или лучом лазера. В качестве источника ИК-излучения при сварке термопластов используют либо трубчатые кварцевые лампы, либо металлические и неметаллические инструменты. Преимуществом этого способа сварки является бесконтактный нагрев свариваемых деталей, что позволяет избежать значительных деформаций и не требует применения антиадгезионных прокладок.

Поглощение лучистой энергии термопластами зависит от физических свойств наполнителя, пластификатора и других факторов. По способности поглощения лучистой энергии термопласты можно расположить в следующем порядке: фторопласт, полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид, полиамид.

Для сварки пленок ИК-излучением созданы отечественные установки (МСП-5у и др.). На машине МСП-5у (сварочная головка которой имеет силитовый стержень длиной 250 мм) при сварке пленок толщиной 45—60 мкм скорость около 3—4 м/мин, а при сварке пакета толщиной 2—2,5 мм скорость 0,5 м/мин. Для пленок из полиолефинов толщиной 45—60 мкм время сварки 2—4 с, а для пленок толщиной 2—2,5 мм время сварки 20—30 с. При толщине пленки 60 мкм из фторопласта-3 время сварки 10—12 с.

Для сварки ИК-излучением встык линолеума из ПВХ в монтажных и заводских условиях разработано устройство типа «Пилад».

Техническая характеристика сварочной головки «Пилад»

Источник ИК-излучения . . .	Кварцевая лампа	Интенсивность излучения, Вт/мм²	Более 0,3
Напряжение, В	220	Технологический зазор, мм . .	0,5—1
Мощность сварочной головки, Вт	1000	Скорость сварки, м/ч	40
Температура нагрева спирали, °С	2200	Расход электроэнергии, Вт/ч	0,072
		Прочность шва на растяжение, %	80—95

Сварку лазером пластмасс производят с помощью молекулярных лазеров мощностью более 1 кВт при КПД 15—20%. Этот вид сварки эффективно используют для соединения пленок с высокими скоростями. Пленки из полиолефинов толщиной 50—150 мкм сваривают CO_2-лазером со скоростью 33—67 м/с. Пленки

из ПВХ лазером свариваются плохо вследствие деструкции поверхностных слоев в фокусе луча. При шовной сварке лазерная установка неподвижна, а пленка непрерывно перемещается таким образом, чтобы луч был направлен в зону контакта.

Нейтронная сварка заключается в облучении зоны сварного шва локальным потоком нейтронов. На свариваемые поверхности пластмассовых деталей предварительно наносят тонкий слой соединений лития или бора. Детали собирают под давлением и облучают нейтронным лучом. При этом в зоне контакта происходят ядерные реакции с выделением тепла. Вследствие этих реакций происходят не только диффузионные процессы, но и рекомбинация химических связей по границе контакта, ведущая к образованию неразъемного соединения. Этот способ применим для сварки пластмасс с низкой вязкостью при повышенных температурах, например для сварки фторопласта-4 или разнородных материалов (керамики, кварца, алюминия, меди с фторопластом-4).

В промышленности находит также применение *сварка без нагрева*. Взаимное течение и перемешивание материала в зоне контакта свариваемых пластмассовых деталей обеспечивается при соответствующей схеме приложений нагрузок без специального подвода тепла в зону контакта. Этим способом можно сваривать лишь термопласты, обладающие повышенной пластичностью при температуре окружающей среды, например — пластифицированные поливинилхлориды. Основным типом соединения в этом случае является нахлесточное. Перед сваркой не более чем за 10—30 мин с поверхностей деталей в зоне шва строганием удаляют слой пластмассы (окисленный и загрязненный) толщиной 100—200 мкм. К собранным деталям прикладывается большое давление, обеспечивающее течение пластмассы в зоне контакта. В зависимости от вязкости материала давление составляет 25—80 кгс/см². Для уменьшения вязкости в зону контакта вводят растворители или присадочный материал того же типа, но содержащий большое количество пластификатора.

Список литературы

1. **Батыгин В. Н., Метелкин И. И., Решетников А. М.** Вакуумно-плотная керамика и ее спаи с металлами. М., «Энергия», 1973. 408 с.
2. **Волков С. С., Орлов Ю. Н., Перняк Б. Я.** Сварка пластмасс ультразвуком, М., «Химия», 1974. 264 с.
3. **Зайцев К. И., Истратов И. Ф., Ляшенко В. Ф.** Сварка пластмассовых трубопроводов. М., «Недра», 1974. 72 с.
4. **Казаков Н. Ф.** Диффузионная сварка в вакууме. М., «Машиностроение», 1968. 332 с.
5. **Карета Н. Л., Нефедов Н. Н.** Сварка углеграфитовых материалов — «Автоматическая сварка», 1967, № 1, с. 56—58.
6. **Керамика** и ее спаи с металлом в технике. М., Атомиздат, 1969, 321 с. Авт.: В. А. Преснов и др.
7. **Тростянская Е. Б., Комаров Г. В., Шишкин В. А.** Сварка пластмасс. М., «Машиностроение», 1967. 252 с.

Приложение

СВАРКА МЕТАЛЛОВ.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ. ГОСТ 2601—74

ВИДЫ СВАРКИ.

Термин	Определение
Сварка	Процесс получения неразъемных соединений посредством устаиовления межатомных связей между свариваемыми частями при их местном или общем нагреве, или пластическом деформировании, или совместным действием того или другого
Наплавка	Нанесение с помощью сварки слоя металла на поверхность изделия
Сварка плавлением	Сварка с местным расплавлением соединяемых частей без применения припоя
Дуговая сварка	Сварка плавлением, при которой нагрев осуществляется электрической дугой
Дуговая сварка плавящимся электродом	Дуговая сварка, выполняемая электродом, который, расплавляясь при сварке, служит присадочным металлом
Сварка открытой дугой	Дуговая сварка плавящимся электродом, осуществляемая без подачи защитного газа или сварочного флюса, при которой зона дуги доступна наблюдению
Дуговая сварка неплавящимся электродом	Дуговая сварка, выполняемая нерасплавляющимся при сварке электродом
Сварка под флюсом	Дуговая сварка, при которой дуга горит под слоем сварочного флюса
Дуговая сварка в защитном газе	Дуговая сварка, при которой в зону дуги подается защитный газ
Аргонодуговая сварка	Дуговая сварка в защитном газе, при которой в качестве защитного газа используется аргон
Сварка в углекислом газе	Дуговая сварка в защитном газе, при которой в зону дуги подается углекислый газ
Подводная сварка	Дуговая сварка, при которой свариваемые части находятся под водой
Импульсно-дуговая сварка	Дуговая сварка, при которой ток периодически изменяют импульсами по заданной программе
Автоматическая дуговая сварка	Дуговая сварка, при которой подача плавящегося электрода и перемещение дуги вдоль свариваемых кромок механизированы

Термин	Определение
Двухдуговая сварка	Автоматическая дуговая сварка, осуществляемая одновременно двумя дугами с раздельным питанием их током
Многодуговая сварка	Автоматическая дуговая сварка, осуществляемая одновременно более чем двумя дугами с раздельным питанием их током
Двухэлектродная сварка	Автоматическая дуговая сварка, осуществляемая одновременно двумя электродами с общим подводом сварочного тока
Многоэлектродная сварка	Автоматическая дуговая сварка, осуществляемая одновременно более чем двумя электродами с общим подводом сварочного тока
Сварка по флюсу	Автоматическая дуговая сварка, при которой на свариваемые кромки наносится слой флюса, толщина которого меньше дугового промежутка
Полуавтоматическая дуговая сварка	Дуговая сварка, при которой механизирована только подача электродной проволоки
Ручная дуговая сварка	Дуговая сварка штучными электродами, при которой подача электрода и перемещение дуги вдоль свариваемых кромок производится вручную
Вибродуговая сварка	Дуговая сварка плавящимся электродом, который вибрирует, вследствие чего дуговые разряды чередуются с короткими замыканиями
Сварка лежачим электродом	Дуговая сварка, при которой неподвижный плавящийся электрод укладывается вдоль свариваемых кромок, а дуга перемещается по мере расплавленя электрода
Сварка наклонным электродом	Дуговая сварка, при которой плавящийся электрод располагается наклонно вдоль свариваемых кромок и по мере его расплавления движется под действием силы тяжести или пружины
Плазменная сварка	Сварка плавлением, при которой нагрев пронзводится сжатой дугой
Электрошлаковая сварка	Сварка плавлением, при которой для нагрева металла используется тепло, выделяющееся при прохождении электрического тока через расплавленный шлак
Электронно-лучевая сварка	Сварка плавлением, при которой для нагрева соединяемых частей используется энергия электронного луча
Лазерная сварка	Сварка плавлением, при которой для местного расплавления соединяемых частей используется энергия светового луча, полученного от оптического квантового генератора
Газовая сварка	Сварка плавлением, при которой нагрев кромок соединяемых частей производится пламенем газов, сжигаемых на выходе горелки для газовой сварки
Термитная сварка	Сварка, при которой иагрев осуществляется сжиганием термита
Контактная сварка	Сварка с применением давления, при которой нагрев производится теплом, выделяемым при прохождении электрического тока через находящиеся в контакте соединяемые части
Стыковая контактиая сварка	Контактная сварка, при которой соединение свариваемых частей происходит по поверхности стыкуемых торцов

Термин	Определение
Стыковая сварка оплавлением	Стыковая контактная сварка, при которой нагрев металла сопровождается оплавлением соединяемых торцов
Стыковая сварка сопротивлением	Стыковая контактная сварка, при которой нагрев металла выполняется без оплавления соединяемых торцов
Точечная контактная сварка	Контактная сварка, при которой соединение элементов происходит на участках, ограниченных площадью торцов электродов, подводящих ток и передающих усилие сжатия
Рельефная сварка	Контактная сварка, при которой соединение элементов происходит на отдельных участках по заранее подготовленным выступам
Шовная контактная сварка	Контактная сварка, при которой соединение элементов выполняется внахлестку вращающимися дисковыми электродами в виде непрерывного или прерывистого шва
Шаговая шовная сварка	Шовная контактная сварка, при которой в период подачи сварочного тока дисковые электроды неподвижны относительно изделия
Шовно-стыковая сварка	Контактная сварка, при которой стыковой шов образуется последовательным нагревом и сжатием соединяемых кромок
Индукционная сварка	Сварка с применением давления, при которой нагрев осуществляется индуктором токами высокой частоты
Сварка запасенной энергией	Сварка, для которой энергия накапливается в специальных устройствах с дальнейшим использованием для нагрева соединяемых частей
Конденсаторная сварка	Сварка запасенной энергией, накопленной в электрических конденсаторах
Сварка взрывом	Сварка, при которой соединение осуществляется в результате вызванного взрывом соударения быстро движущихся частей
Магнитно-импульсная сварка	Сварка, при которой соединение осуществляется в результате соударения соединяемых частей, вызванного воздействием импульсного магнитного поля
Сварка давлением	Сварка, осуществляемая при температурах ниже точки плавления свариваемых металлов без использования припоя и с приложением давления, достаточного для создания необходимой пластической деформации соединяемых частей
Печная сварка	Сварка давлением, при которой нагрев производится в печах или горнах
Кузнечная сварка	Сварка давлением, при которой осадка выполняется ударами молота
Сварка прокаткой	Сварка давлением, осуществляемая пластическим деформированием в прокатных валках
Газопрессовая сварка	Сварка давлением, при которой нагрев производится пламенем газов, сжигаемых на выходе сварочной горелки

Термин	Определение
Диффузионная сварка	Сварка давлением, осуществляемая за счет взаимной диффузии атомов контактирующих частей при относительно длительном воздействии повышенной температуры и при незначительной пластической деформации
Сварка трением	Сварка давлением, при которой нагрев осуществляется трением, вызываемым вращением одной из свариваемых частей
Ультразвуковая сварка	Сварка давлением, осуществляемая при воздействии ультразвуковых колебаний
Холодная сварка	Сварка давлением при значительной пластической деформации без внешнего вида соединяемых частей
Сварка в контролируемой атмосфере	Сварка, осуществляемая в камерах, заполненных газом определенного состава

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Алюминий — Теплофизические свойства 228
Аргонодуговая сварка никелевых сплавов 279, 282—285
— — разнородных и цветных металлов и сплавов 359
— — стали с алюминием и его сплавами 353—355
Ацетилен для газопламенной обработки 73
— Распад взрывчатый 72, 73
— Свойства 72, 73

Б

Биметалл медь—сталь — Особенности сварки 267
Бронзы безоловянные алюминиевые 57
— — бериллиевые 258
— — кремнистые 257
— — марганцовистые 257
— — хромистые 258

В

Вставки биметаллические для сварки разнородных металлов 362, 363
— — присадочные при сварке труб 35

Г

Газовая сварка алюминиевых сплавов 229, 230
— — меди и медных сплавов 259
— — никелевых и медно-никелевых сплавов 275—277
— — свинца 249
— — серебра и его сплавов 251
— — чугуна 385—390
Газы горючие при газопламенной обработке — Коэффициент замены ацетилена 80, 81
— Область применения 80
— Основы расчета огневой аппаратуры 81, 82
— Свойства 75, 76
Газы сжатые — Водород 76
— Городской 77
— Коксовый 77
— Метан 76
— Нефтяной 77
— Пиролизный 77
— Природный 76, 77
— Сланцевый 77
— Углерода окись 77
Газы сжиженные — Горючее МАФ 78
— Метилацетилен-пропадиен 78
— Пропан-бутановые смеси 78
Горелки сварочные — Техническая характеристика 438
Горючие жидкие — Бензин 79
— Керосин 79
Горючие — заменители ацетилена — Расчетные характеристики газов 79, 80
ГОСТ 2.115—70 39
ГОСТ 380—71 44, 45, 47—49, 52, 87
ГОСТ 492—73 269, 278
ГОСТ 493—54 22, 256
ГОСТ 613—65 257
ГОСТ 614—73 257
ГОСТ 849—70 268
ГОСТ 859—66 253—255, 409
ГОСТ 949—73 71
ГОСТ 1050—74 44, 87, 116
ГОСТ 1146—70 149
ГОСТ 1215—59 367
ГОСТ 1292—74 249
ГОСТ 1412—70 366
ГОСТ 1415—70 70
ГОСТ 1460—76 73, 74
ГОСТ 2179—75 275
ГОСТ 2246—70 9, 10, 14, 16, 17, 19, 26, 34, 35, 39, 103, 136, 139, 149, 154, 166, 168, 170, 175, 180, 205, 275
ГОСТ 2604—77—ГОСТ 2604.12—77 47
ГОСТ 2652—71 69
ГОСТ 2671—70 30, 376, 385
ГОСТ 2789—73 19, 40, 46
ГОСТ 3226—65 69
ГОСТ 3778—74 249

ГОСТ 3882—74 410
ГОСТ 4416—73 69
ГОСТ 4417—75 69
ГОСТ 4418—75 69
ГОСТ 4421—73 69
ГОСТ 4422—73 69
ГОСТ 4426—71 33
ГОСТ 4543—71 87, 116
ГОСТ 4755—70 69, 413
ГОСТ 4757—67 70
ГОСТ 4759—69 69
ГОСТ 4761—67 70
ГОСТ 4986—70 34, 35
ГОСТ 5017—74 22, 257
ГОСТ 5100—73 69
ГОСТ 5165—49 69
ГОСТ 5279—74 69
ГОСТ 5457—75 73
ГОСТ 5494—71 69
ГОСТ 5520—69 87
ГОСТ 5521—76 87
ГОСТ 5583—68 71
ГОСТ 5632—72 47, 52, 163, 275
ГОСТ 5905—67 70
ГОСТ 6008—75 69
ГОСТ 6032—75 52, 64
ГОСТ 6331—68 71
ГОСТ 6836—72 250, 251
ГОСТ 6912—74 69
ГОСТ 6996—66 49, 51
ГОСТ 7122—75 47
ГОСТ 7293—70 366
ГОСТ 7512—75 46
ГОСТ 7871—75 19, 222, 223, 230
ГОСТ 8050—76 138, 170
ГОСТ 8856—72 79
ГОСТ 9013—59 65
ГОСТ 9087—69 103, 154
ГОСТ 9466—75 36, 44, 53—55, 64, 65, 204
ГОСТ 9467—75 37—39, 49, 52, 67, 98—101, 109, 134, 154
ГОСТ 9721—71 69
ГОСТ 9849—74 69
ГОСТ 10051—75 36, 38, 39, 47, 65, 66, 68
ГОСТ 10052—75 36—39, 49, 57, 68, 134, 174, 175, 204, 279
ГОСТ 10157—73 138, 170, 209, 232, 251, 265, 307, 353
ГОСТ 10196—62 78
ГОСТ 10543—75 26, 28, 35
ГОСТ 10561—73 69
ГОСТ 10690—73 69
ГОСТ 10720—75 33
ГОСТ 10994—74 275
ГОСТ 11546—75 31, 32
ГОСТ 11878—66 52
ГОСТ 12344—66—ГОСТ 12346—66 47
ГОСТ 12347—77 47
ГОСТ 12348—66—ГОСТ 12365—66 47
ГОСТ 13078—67 69
ГОСТ 13079—67 69
ГОСТ 14111—77 83
ГОСТ 14327—69 69
ГОСТ 14806—69 229
ГОСТ 15527—70 22, 256, 409
ГОСТ 15878—70 229, 241
ГОСТ 16098—70 267
ГОСТ 16130—72 21, 389
ГОСТ 16773—71 70
ГОСТ 17051—71 47
ГОСТ 17217—71 22
ГОСТ 17293—71 69
ГОСТ 17711—72 256
ГОСТ 18175—72 22, 256
ГОСТ 18895—73 47
ГОСТ 19738—74 409
ГОСТ 20813—75 47
ГОСТ 21235—75 69
ГОСТ 21286—75 69
ГОСТ 21448—75 32
ГОСТ 21449—75 33
ГОСТ 22536.0—ГОСТ 22536.13—77 47
Графит — Свойства в сравнении с вольфрамом 429

Д

Дефекты сварных соединений инструментальных материалов при контактной сварке оплавлением 405
— — трением 405
Дефекты чугунных отливок 371
Диффузионная сварка алюминиевых и медных сплавов в вакууме 361
— — алюминиевых сплавов со сталью 356
— — аустенитных сталей в вакууме 215, 216
— — керамических материалов с металлами 424, 425
— — чугунов 391
Диффузионно-вакуумная сварка бериллия 248
Дуговая сварка бериллия вольфрамовым электродом в камере с контролируемой атмосферой 246, 247
— — графита 431, 432
— — меди в защитных газах 259, 265, 266
— — свинца угольным или графитовым электродом 249
— — сплавов серебра вольфрамовым электродом в аргоне 251

— — титана в вакууме 317
— — титановых сплавов в среде защитных газов 306—314

И

Инструмент из быстрорежущей стали — Технология пайки 412—414
— — твердосплавный — Технология пайки 408—412
— — твердосплавный паяный — Пути уменьшения остаточных напряжений 409—411

К

Карбид кальция — Транспортировка 74 — Физико-механические показатели 74
Карта технологическая стыковой сварки заготовок инструмента из быстрорежущей стали с конструкционными сталями 400, 401
Керамика — Понятие 415
— Свойства 415
— Структура 415
Кислород — Свойства 71, 72
Кольца присадочные при сварке труб грибовидные 35
— — плоские 35
Контактная сварка пластмасс оплавлением 438—441
— — пластмасс проплавлением 438, 441—443
— — стыковая оплавлением алюминия с медью 361
— — стыковая сопротивлением алюминия с медью 361
— — теплоустойчивых сталей 157, 158
— — титановых сплавов 317, 318
— — точечная алюминия со сталью 355
— — чугуна 390

Л

Латуни — Понятие 256, 257
Лента наплавочная металлокерамическая — Характеристика 34, 35
— — порошковая — Характеристика 34, 35

М

Материалы для сварки под флюсом — Марки 103
Материалы инструментальные — Допуски на заготовки и сборку свариваемого инструмента для контактной стыковой сварки 402
— Механические свойства 394
— Физические свойства 393
Материалы керамические вакуумноплотные — Классификация по химико-минералогическому составу 416
— — на основе окиси алюминия — Свойства 415—419
— Физико-механические свойства 416
— Химический состав 416
Материалы конструкционные — Относительные показатели свойств 221
Материалы присадочные для сварки под флюсом 136, 137
— — для электрошлаковой сварки 35
Материалы сварочные для аустенитно-ферритных, аустенитных сталей и сплавов на никелевой основе 344
— — для мартенситных и мартенситно-ферритных сталей 174, 175
— — для перлитных, мартенситных и ферритных сталей с аустенитными сталями и сплавами на никелевой основе 346
— — для перлитных сталей 343
— — для перлитных сталей с высокохромистыми мартенситными, ферритными и аустенитно-ферритными сталями 345
Медь — Рекомендации по сварке 258, 259
— Свариваемость 253—256
— Свойства 253, 255
— Химический состав 254
Металл наплавленный — Группа индексов, характеризующих наплавленный металл 56, 57
— — после сварки высокохромистых сталей в углекислом газе и термической обработки 177 — Механические свойства 177 — Химический состав 177
— — при ручной дуговой сварке покрытыми электродами высокохромистых сталей 176, 181
— Твердость 66
Металлы тугоплавкие — Понятие 289
— Предельная растворимость примесей внедрения 292
— Пути получения качественных сварных соединений 293—295
— Свойства 290, 291
Металлы цветные для сварки разнородных сплавов — Свойства 348,349
Металл швов высокохромистых мартенситных сталей — Механические свойства 175 — Химический состав 177

Металл шва при сварке аргонодуговой аустенитных сталей и сплавов — Механические свойства 212
— — в углекислом газе хромоникелевых высоколегированных сталей — Механические свойства 214
— — высоколегированных коррозионно-стойких и жаростойких сталей — Механические свойства 204
— — высоколегированных сталей и сплавов — Механические свойства 206, 207
— — низкоуглеродистых сталей — Механические свойства 97, 110
— — под флюсом — Механические свойства 106
Металл швов хромистых сталей при автоматической сварке под флюсом — Механические свойства 178 — Химический состав 178
МРТУ 6—02—274—66 265
МРТУ 6—05—1287—70 69
МРТУ 51—77—66 138

Н

Нагреватели дисковые для контактной сварки труб оплавлением — Характеристика 440
Наплавка меди на сталь 267
Нейтронная сварка пластмасс 449
Никель — Механические свойства 268, 269, 284 — Химический состав 268, 269

О

Образцы сварные для испытаний тавровые — Размеры 44
— — трубные 44,45 — Конструктивные элементы подготовки кромок 45
ОСТ 2МТ212—76 380
ОСТ ЦМ-1414—39 249

П

Пайка графита 429—431
— — керамических материалов с металлами 419, 423
Пайкосварка чугуна латунными припоями 389
— — чугунным припоем 388
Пластмассы — Классификация способов сварки 437
— Основные схемы контактной сварки 439
— Параметры контактной сварки труб в раструб 441
— Параметры контактной сварки труб оплавлением 440
— Прочность сварных соединений, полученных разными методами 446
— Рекомендации по сварке ультразвуком 447
Покрытия керамики металлизационные — Режимы вжигания 421 — Составы 421
Покрытия электродов для сварки алюминия — Состав 231
— — меди — Состав 262
— — чугуна — Состав 377
Полуавтоматическая сварка чугуна проволоками из цветных металлов 384
— — на основе никеля 384, 385
— — порошковыми 377—380
Припои для пайки графита — Состав 430
— — пластинок из быстрорежущей стали — Состав 413
— — твердых сплавов — Состав 409
Проволока для аргонодуговой сварки никелевых сплавов 284
— — для изготовления электродов 9
— — для сварки 9
Проволока присадочная для атомно-водородной сварки 149
— — для газовой сварки 149
— — для сварки меди неплавящимся электродом 266
Проволока сварочная высоколегированная 9
— — легированная 9
— — низкоуглеродистая 9
Проволока порошковая — Характеристика 34
— для изготовления покрытых электродов 166, 167
— — для механизированной сварки 168, 169
— — самозащитная — Применение 34
Проволока сварочная — Временное сопротивление разрыву 17, 24
— Диаметр 10, 19, 21
— Классификация 9
— Марки 21, 205
— Масса мотков 16, 24
— Обозначение 9, 10
— Размеры катушек 20
— Размеры мотков 16, 24
— Технические требования 10
— Химический состав 11—15, 18, 23
Проволока стальная наплавочная — Диаметр 28
— Марки 29
— Масса мотков 28

— Назначение 29
— Обозначение 26
— Размеры мотков 28
— Химический состав 27, 28
Проволока электродная из никеля и никелевых сплавов — Марки 275
Прослойки диффузионные 339
— — интерметаллидов типовые при сварке алюминия со сталью и никелем 350
Прутки из меди и сплавов на медной основе — Диаметр 22
— Марки 22
— Назначение 25
— Химический состав 23

Р

Режимы автоматической аргонодуговой импульсной сварки титановых сплавов вольфрамовым электродом 312
Режимы автоматической аргонодуговой сварки алюминиевых сплавов плавящимся электродом 234
— — никелевых сплавов вольфрамовым электродом 283
Режимы автоматической и полуавтоматической стыковой сварки плавящимся электродом аустенитных сталей в нижнем положении 210
Режимы автоматической и полуавтоматической сварки под флюсом угловых швов конструкционных сталей «в лодочку» 105, 106
— — наклонным электродом 106
Режимы автоматической и полуавтоматической сварки стыковых швов конструкционных сталей без разделки кромок в углекислом газе 108
— — угловых швов конструкционных сталей в углекислом газе 108
Режимы автоматической сварки конструкционных сталей в среде углекислого газа 144
— — плавящимся электродом 143
Режимы автоматической сварки магниевых сплавов вольфрамовым электродом 243
— — под флюсом многослойных стыковых швов конструкционных сталей 105
— — под флюсом титана 315
Режимы автоматической электродуговой сварки алюминиевых сплавов плавящимся электродом по слою флюса 231
Режимы аргонодуговой сварки аустенитных сталей вольфрамовым электродом 209
— — тугоплавких металлов 325
Режимы двусторонней сварки стыковых швов конструкционных сталей с V-образной разделкой кромок 104, 105
Режимы диффузионной сварки керамики с металлами 425
— — никелевых сплавов 286
Режимы дуговой полуавтоматической сварки высокопрочного чугуна 380
— — дуговой сварки аустенитных сталей без разделки кромок плавящимся электродом в углекислом газе 213
— — импульсной автоматической аргонодуговой сварки алюминиевых сплавов плавящимся электродом 235
— — импульсно-дуговой сварки конструкционных сталей 143
Режимы контактной сварки пластмасс 439, 442
— чугуна 390
Режимы механизированной аргонодуговой сварки стыковых соединений титана и его сплавов вольфрамовым электродом 312
— — однопроходной аргонодуговой сварки тугоплавких сплавов 326
— — однопроходной сварки алюминиевых сплавов вольфрамовым электродом погруженной дугой 233
— — плазменной сварки алюминиевых сплавов встык за один проход 235
— — полуавтоматической аргонодуговой сварки титановых сплавов вольфрамовым электродом 311
Режимы полуавтоматической сварки алюминиевых сплавов плавящимся электродом 234
— — конструкционных сталей плавящимся электродом в среде углекислого газа 144
— — титана под флюсом 315
Режимы прерывистой шовной сварки аустенитных сталей 217
— — низкоуглеродистых сталей 114
Режимы роликовой сварки конструкционных сталей 148
Режимы ручной аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом алюминиевых сплавов 232, 233
— — магниевых сплавов 242
— — титановых сплавов 310
Режимы ручной аргонодуговой сварки стыковых соединений никеля 283

Режимы ручной дуговой сварки алюминия и его сплавов покрытыми электродами 231
— — аустенитных сталей 204
— — никелевых сплавов качественными электродами 277
Режимы сварки конструкционных сталей неплавящимся электродом 141
— — под слоем флюса 137
— — угольным электродом в углекислом газе 107
Режимы сварки меди неплавящимся электродом 266
— — под флюсом угольным электродом 263
Режимы сварки низколегированных сталей 135
— — пластмасс ультразвуком 447
— — серебра вольфрамовым электродом 252
Режимы сварки сопротивлением круглых или квадратных заготовок из углеродистой стали 114
Режимы сварки стыковых соединений из алюминия 230
— — из никеля 282
Режимы сварки титана плавящимся электродом в среде защитных газов 314
Режимы сварки титановых сплавов сжатой дугой 313
— — трением заготовок инструмента 406, 407
Режимы стыковой контактной сварки быстрорежущих сталей с конструкционными 403
— — стыковой сварки конструкционных сталей неплавящимся электродом без активирующих флюсов и с флюсами 143
Режимы точечной сварки аустенитных сталей 22, 217, 218
— — конструкционных сталей 113, 148
— — никеля и его сплавов 287
Режимы шовной сварки низкоуглеродистой стали непрерывной 113
— — прерывистой 114
Режимы электронно-лучевой сварки аустенитных сталей 208
— — конструкционных сталей 145
— — тугоплавких металлов 325
Режимы электрошлаковой сварки титана плавящимся мундштуком 317
— — проволочными электродами 316
Рельефная сварка аустенитных сталей 219, 220
Ручная дуговая сварка медных сплавов покрытыми электродами 259, 262
— — никелевых сплавов 277—279
Ручная сварка чугуна электродами покрытыми 367, 377
— — из цветных металлов на медной основе 380, 381

С

Сварка алюминия и его сплавов с титаном 361
Сварка аустенитных сталей в защитных газах 208, 209
— — трением 220
Сварка графитовых материалов нагревом в жидких углеводородах 432—434
Сварка меди и ее сплавов с титаном 361
— — с ниобием, молибденом, танталом 361, 362
— — со сталью 267
— — угольным электродом 262 — Режимы 263
Сварка ниобия с молибденом 362
Сварка пластмасс газовым теплоносителем 436—438
— — лазером 448, 449
— — ТВЧ 444, 445
— — трением 444
— — ультразвуком 445—448
— — экструдируемой присадкой 443, 444
Сварка платиновых металлов 330
— — по флюсу разнородных цветных металлов 359, 360
Сварка стали с ванадием 358, 359
— — с медью и ее сплавами 356, 357
— — с молибденом 358
— — с ниобием 358
— — с титаном 358
Сварка термопластов плавлением 435
— — титановых сплавов под флюсом 314—316
Сварка трением алюминия с медью 361
— — стали с алюминием и его сплавами 355
Сварка чугуна электродами с карбидообразующими элементами в покрытии 381—384
— — стальными электродами 384
Свинец — Марки 249
Серебро — Марки 250 — Механические свойства 251
Смеси порошков для наплавки — Гранулометрический состав 32
— Область применения 32
— Плотность 32
— Химический состав 31

Смеси формовочные — Содержание 371
Соединения алюминиевых сплавов, сваренных автоматической дуговой сваркой плавящимся электродом в аргоне — Механические свойства 238
Соединения сварные из аустенитно-ферритных, аустенитных сталей и сплавов на никелевой основе 343, 344
— — из высокохромистых сталей мартенситного, ферритного и аустенитно-ферритного классов 343
— из перлитных, мартенситных и ферритных сталей с аустенитными сталями и сплавами на никелевой основе 345—347
— — из перлитных сталей 342, 343
— — из перлитных сталей с высокохромистыми мартенситными, ферритными и аустенитно-ферритными сталями 344, 345
Соединения сварные из разнородных сталей — Жаропрочность 339
— Зона сплавления сварных соединений 335—339
— Классификация сталей 332
— Неоднородность состава сварного шва 334, 335
— Области применения 333
Остаточные напряжения 340—342
Условия работы 333
Соединения титановых сплавов, выполненные автоматической аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом без присадочного материала 313
Соединения точечные — размеры 112
— — шовные — Размеры 112
Сплавы алюминиевые — Классификация по бинарной диаграмме 222
— Подготовка под сварку 228, 229
— Типы соединений 229
— Характеристика 221
Сплавы магниевые деформируемые 239 — Свойства 243—245
— — литейные 239
— Диаметры присадочной и сварочной проволоки для различных толщин 241
— Подготовка деталей под сварку 240, 241
— Склонность к образованию трещин при аргонодуговой сварке с присадкой 240
— Технология сварки 241—243
— Типы соединений 241
Сплавы медно-никелевые — Свариваемость 258
Сплавы на основе молибдена — Механические свойства 327 — Химический состав 327
— — никеля, используемые в промышленности — Химический состав 270, 271
— — хрома — Механические свойства 326 — Химический состав 326
Сплавы никелевые — Материалы для сварки под флюсом 279
— Механические свойства 272, 273
— Некоторые особенности процесса сварки 274, 275
— Состав покрытия электродов 278
Сплавы ниобиевые — Механические свойства 323 — Химический состав 323
— — порошкообразные — Состав 390
— — серебряно-медные — Состав 251
— — твердые — Паяемость 410
Сплавы титановые — Механические свойства 297, 316
— Производительность наплавки при ручной и полуавтоматической аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом 311
— Состав 297, 298
— Структура 297—299
— Термическая обработка 305, 306
Сплавы циркониевые — Механические свойства 321 — Химический состав 321
Сормайт порошкообразный — Химический состав 32, 33
Стали аустенитные — Коррозионная стойкость сварных соединений 213
Стали высокохромистые ферритные — Механические свойства металла швов и соединений при сварке в углекислом газе 182
— Механические свойства наплавленного металла при ручной дуговой сварке покрытыми электродами 181
— Состав швов при сварке различными материалами 183
— Состав электродной проволоки при механизированных методах сварки 182
Стали конструкционные — Классификация 116—118
— Механические свойства 116, 117
— Рекомендации по сварке 130—133
— Свариваемость 119—122
— Свойства 116, 117
— Химический состав 116, 117
Стали теплоустойчивые — Сварочные материалы для дуговой сварки 153—155

— Свойства сварных соединений 156, 157, 161—165
— Термическая обработка сварных соединений 155—157
Стержни керамические для сварки чугуна — Состав 379
— — электродные — Химический состав медных сплавов для изготовления проволок 262
Стыковая сварка аустенитных сталей оплавлением 218, 219

Т

Термопласты — Свойства 435
Титан — Механические свойства соединений, выполненных электрошлаковой сваркой 317
— Схемы защиты при аргонодуговой сварке 309
Трактора сварочные — Техническая характеристика 438
ТУ 6-10-1363—73 69
ТУ 11ЯЕ-0021-056—72 138
ТУ 14-1-467—72 136
ТУ 14-4-88—72 381
ТУ 14-4-318—73 382
ТУ 14-4-452—73 382
ТУ 14-8-64—73 69
ТУ 14-130-28—72 154
ТУ 14-130-54—73 138
ТУ 14-168-17—76 262
ТУ 21-01-478—71 69
ТУ 45-ЦМ-1150—63 138
ТУ 48-02-48—70 408
ТУ 48-02-62—61 408
ТУ 48-08-476—71 409
ТУ 48-21-80—72 384
ТУ 48-21-87—72 409
ТУ 48-21-305—74 389
ТУ 48-42-73—71 138
ТУ 81/БВ-04—171—69 69
ТУ 1029—62 216
ТУ ВМ2-529—57 138
ТУ ИЭС-48—68 378

У

Установки высокочастотные — Характеристика 445
Устройства для предварительного нагрева чугунных деталей 374, 375
— — для сварки ультразвуком — Техническая характеристика 448

Ф

Флюсы для автоматической сварки алюминиевых сплавов плавящимся электродом 231
Флюсы для газовой сварки никелевых сплавов — Состав 277
— — чугуна — Состав 386
Флюсы для пайки инструментальных материалов — Состав 408
— — для пайкосварки латунными припоями — Состав 389
Флюсы для сварки алюминиевых бронз 261
— — высокохромистых сталей 170
— — меди и ее сплавов 261
Флюсы для сварки газовой 386
— — электродуговой 206
— — электрошлаковой 206

Х

Химическая сварка пластмасс 436
Холодная сварка давлением алюминия с медью 361
— — стали с алюминием и его сплавами 355

Ч

ЧМТУ 1-789—69 136
ЧМТУ 1-846—69 139
ЧМТУ 4-332—70 383
ЧМТУ ЦНИИЧМ 1-91—67 139
ЧМТУ ЦНИИЧМ 277—60 166
ЧМТУ ЦНИИЧМ 442—61 166
ЧМТУ ЦНИИЧМ 582—61 139
ЧМТУ ЦНИИЧМ 649—63 168
ЧМТУ ЦНИИЧМ 671—62 166
ЧМТУ ЦНИИЧМ 1033—63 136
Чугун белый — Характеристика 365, 366
— — высокопрочный с шаровидным графитом — Характеристика 365—367
— — ковкий — Характеристика 365, 367, 368
— — серый — Характеристика 365, 366 — Основные свойства 367
Чугуны — Графитизаторы 365
— Классификация методов сварки 370
— Особые рекомендации по сварке 371—376
— Рекомендуемые способы разделки дефектов под газовую сварку 372
— Свариваемость 368, 369

Э

Электродуговая сварка меди под флюсом плавящимся электродом 259

Электроды для дуговой сварки высоколегированных сталей — Условные обозначение 64, 65
— — конструкционных сталей 133—135
Электроды для контактной сварки — Материалы 83—86
Электроды для наплавки — Марки 66, 67 — Типы 66, 67
Электроды для сварки высоколегированных сталей 203
— — конструкционных сталей 67
— — теплоустойчивых сталей 67
Электроды контактных машин — Материалы 84, 85
Электроды неплавящиеся вольфрамовые — Характеристика 33
— — графитовые — Характеристика 33
— — угольные — Характеристика 33
Электроды покрытые для ручной дуговой наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами — Типы 65—67
Электроды покрытые для ручной дуговой сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами — Типы 57
— — цветных металлов 68
— — чугуна 68
Электроды покрытые для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами — Химический состав наплавленного металла 58—63
Электроды покрытые — Допускаемое количество включений 41
— Изготовление методом опрессовки 70
— Классификация 36
— Компоненты покрытия 69
— Масса партии 42
— Методы испытаний 43—52
— Обозначение 37
— Производство 69, 70
— Размеры 37
— Типы 52, 53
— Толщина покрытия 36, 40, 41
— Требования к химическому составу наплавленного металла и сварных соединений при испытании электродов 55
— Условные обозначения 38
Электроды со стержнем из сплава на медной основе 381
— — на основе никеля 382, 383
Электронно-лучевая сварка аустенитных сталей 214, 215
— — бериллия 247, 248
— — керамических материалов с металлами 425, 426
— — титана 317
Электрошлаковая сварка конструкционных сталей 111
— — меди 259, 264, 265
— — чугуна 391

ИБ № 80

Александр Иванович Акулов,
Гнеся Абрамовна Асиновская,
Вадим Валентинович Баженов и др.

СВАРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ
Том 2

Редактор *И. И. Лесниченко*
Художественный редактор *П. П. Рогачев*
Технический редактор *Н. Ф. Демкина*
Корректоры *И. М. Борейша, Н. И. Шарунина*
Переплет художника *А. Я. Михайлова*

Сдано в набор 24.04.78. Подписано в печать 14.11.78. Т-18066. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 29. Уч.-изд. л. 42,3. Тираж 40 000 экз. Заказ № 1921. Цена 2 р. 50 к.

Издательство «Машиностроение», 107885, Москва, ГСП-6, 1-й Басманный пер., 3

Ордена Октябрьской Революции, ордена Трудового Красного Знамени Ленинградское производственно-техническое объединение «Печатный Двор» имени А. М. Горького Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 197136, Ленинград, П-136, Гатчинская ул., 26.