Справочник по сварке

Справочник по сварке

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

ТОМ
4

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МАШИНОСТРОЕНИЕ»
Москва 1971

УДК 621 791

Справочник по сварке. Том 4. Под редакцией д-ра техн наук проф. А И Акулова. М. «Машиностроение» 1971 Стр 416.

В томе изложены методы расчета режимов сварки металлов рассмотрена техника и технология сварки различных сталей, чугунов, цветных, тугоплавких и разнородных металлов и сплавов сварка пластмасс, а также методы восстановления размеров деталей машин

Справочник предназначен для инженеров и техников работающих в области сварочного производства на заводах, в проектных и исследовательских организациях Он может быть полезен преподавателям и студентам втузов. Рис. 220, табл 269, библ. 407.

3-12-16
БЗ № 38—1971 г.—№ 50

СПРАВОЧНИК ПО СВАРКЕ Том 4
Под редакцией д-ра техн наук проф А И Акулова

Редактор издательства *А Г Сазонов*
Технический редактор *Т. Ф Соколова* Корректор *Л В Асташенок*

Сдано в производство 28 IX 1970 г Подписано к печати 8/VII 1971 г Т-09574
Тираж 30 000 экз Печ л 26 Бум л 13 Уч-изд л 39 Формат 60×90¹/₁₆
Цена 2 р 31 к Заказ № 1397

Издательство «МАШИНОСТРОЕНИЕ», Москва, Б-66, 1-й Басманный пер., 3

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградская типография № 1 «Печатный Двор» им А М Горького Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР г Ленинград Гатчинская ул 26

АВТОРЫ ТОМА:

Акулов А. И., д-р техн. наук, **Баженов В. В.**, канд. техн. наук; **Бельчук Г. А.**, д-р техн. наук; **Бережницкий С. Н.**, инж., **Вощанов К. Н.**, инж.; **Вощанов А. К.**, инж.; **Головин В. Л.**, инж.; **Земзин В. Н.**, д-р техн. наук, **Имшеник К. Н.**, инж., **Крюковский В. Н.**, канд. техн. наук, **Левтонов Н. Н.**, канд. техн. наук; **Лейпачук Е. Н.**, инж.; **Любавский К. В.**, д-р техн. наук, **Медовар Б. И.**, д-р техн. наук, **Мордвинцева А. В.**, канд. техн. наук; **Назаров Г. В.**, канд. техн. наук, **Никифорова К. Г.**, инж.; **Ольшанский Н. А.**, д-р. техн. наук, **Пашовко В. М.**, инж., **Парусов А. И.**, инж.; **Петров Г. Л.**, д-р техн. наук, **Поплавко-Михайлов М. В.**, д-р техн. наук, **Рыкалин Н. Н.**, академик АН СССР; **Сокол И. А.**, инж.; **Стеклов О. И.**, канд. техн. наук, **Тимофеев М. М.**, канд. техн. наук; **Фролов В. В.**, д-р техн. наук; **Фрумин И. И.**, д-р техн. наук; **Чулошников П. Л.**, канд. техн. наук; **Чекотило Л. В.**, канд. техн. наук; **Шорников М. Х.**, д-р техн. наук.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава I. **Критерий расчетного определения параметров режимов сварки** (академик *Н. Н. Рыкалин*, д-р техн. наук *М. Х. Шоршоров*) 7

Общие сведения 7
Металлы и сплавы с большим объемным эффектом полиморфного превращения 8
Металлы и сплавы с малым объемным эффектом полиморфного превращения 11
Металлы и сплавы, не имеющие полиморфных превращений 27
Литература 29

Глава II. **Сварка низкоуглеродистых конструкционных сталей** (д-р техн. наук *А. Н. Акулов*, инж. *И. А. Сокол*) 30

Общие сведения о свариваемости 30
Газовая сварка 33
Сварка покрытыми электродами 33
Сварка под флюсом 35
Сварка в защитных газах 38
Сварка порошковой проволокой и проволоками сплошного сечения без дополнительной защиты 41
Электрошлаковая сварка 42
Контактная сварка 43
Литература 45

Глава III. **Сварка конструкционных среднеуглеродистых, низколегированных повышенной прочности и высокопрочных сталей** (д-р техн. наук *М. В. Попилко-Михайлов*, инж. *К. Г. Никифорова*) 46

Общие сведения о свариваемости 46
Механические свойства и структура сварных соединений 51
Особенности сварки 61
Газовая, атомноводородная и аргоно-дуговая сварка 63
Дуговая сварка покрытыми электродами 63
Сварка под флюсом 68
Сварка в защитных газах 72
Электроннолучевая сварка 79
Точечная и роликовая сварка 81
Литература 84

Глава IV. **Сварка теплоустойчивых сталей** (канд. техн. наук *В. В. Баженов*) 85

Общие сведения о свариваемости 85
Дуговая сварка 86
Выбор технологии 86
Свойства сварных соединений 89
Контактная стыковая сварка 91
Литература 92

Глава V. **Сварка аустенитных сталей** 93

Свариваемость аустенитных сталей (д-р техн. наук *К. В. Любавский*, канд. техн. наук *М. М. Тимофеев*) 93
Общие сведения 93
Особенности сварки 95
Материалы для сварки 102
Сварка жаропрочных сталей (д-р техн. наук *К. В. Любавский*, канд. техн. наук *М. М. Тимофеев*) 107
Основные свойства и особенности сварки 107
Термическая обработка конструкций и локальные разрушения 110
Сварка коррозионностойких сталей (д-р техн. наук *Б. И. Медовар*, канд. техн. наук *Л. В. Чекотило*) 121

Основные свойства и особенности сварки 121
Технология сварки 126
Сварка жаростойких сталей (д-р техн. наук *Б. И. Медовар*, канд. техн. наук *Л. В. Четверко*) 138
Основные свойства и особенности сварки 138
Технология сварки 141
Литература 153

Глава VI. **Сварка высокохромистых мартенситных, мартенситно-ферритных и ферритных сталей** (д-р техн. наук *Л. Л. Петров*) 157

Основные свойства и классификация сталей 157
Сварка высокохромистых мартенситных и мартенситно-ферритных сталей 164
Сварка высокохромистых ферритных сталей 173
Литература 175

Глава VII. **Сварка никеля и никелевых сплавов** (д-р техн. наук *А. И. Акулов*, инж. *И. А. Сокол*) 176

Основные свойства и особенности сварки никеля и его сплавов 176
Газовая сварка 183
Ручная дуговая сварка 184
Сварка под флюсом и электрошлаковая сварка 187
Аргоно-дуговая сварка 189
Контактная сварка 192
Литература 193

Глава VIII. **Сварка разнородных металлов и сплавов** 194

Сварка разнородных сталей (д-р техн. наук *В. Н. Земзин*) 194
Особенности сварки 194
Сварка разнородных сталей одного структурного класса 202
Сварка сталей разного структурного класса 207
Сварка разнородных сплавов (д-р техн. наук *Г. А. Бенгар*) 211
Особенности сварки 211
Сварка алюминия и его сплавов со сталью 216
Сварка меди и ее сплавов со сталью 219
Сварка алюминия и его сплавов с медью 222
Сварка титана со сталью и сплавами цветных металлов 223
Сварка ниобия, тантала и молибдена со сталью и сплавами цветных металлов 225
Применение биметалла для получения сварных соединений 225
Литература 227

Глава IX. **Наплавка износостойких и других специальных сталей и сплавов** (д-р техн. наук *И. И. Фрумин*, инженеры *Е. И. Лайначук* и *В. М. Иановко*) 229

Общие сведения 229
Основы технологии наплавки 229
Современные способы наплавки 229
Легирование металла наплавки 239
Наплавленный металл 244
Основной металл 245
Наплавочные материалы 245
Металлические электроды для ручной дуговой наплавки 245
Электродная проволока и лента для механизированной наплавки 249
Флюсы для механизированной наплавки 251
Гранулированные порошки 252
Прочие наплавочные материалы 254
Производство наплавочных работ 254
Выбор способа наплавки 254
Восстановление наплавкой деталей тракторов, автомобилей и сельскохозяйственных машин 255
Наплавка деталей землеройных, дорожных и строительных машин 259
Наплавка деталей дробильно-размольного и горнорудного оборудования . . . 260
Наплавка железнодорожных рельсов и крестовин 261
Восстановление наплавкой изношенных деталей подвижного состава железнодорожного транспорта 261
Наплавка деталей металлургического оборудования 262
Наплавка штампов 264
Наплавка лопастей гидротурбин 267

Наплавка судовых валов 268
Армирование и наплавка бурового инструмента 268
Наплавка деталей двигателей внутреннего сгорания 269
Сварка и пайка инструментальных материалов (инженеры *К. Н. Вощанов*, *В. Д. Головин*) 279
Литература 280

Глава X. **Сварка чугуна** (инженеры *К. Н. Вощанов* и *А. К. Вощанов*) 284

Общие сведения о свариваемости 284
Горячая сварка серого чугуна 285
Газовая сварка 285
Дуговая сварка 288
Термитная сварка и сварка промежуточным литьем 290
Холодная сварка серого чугуна 290
Газовая сварка 291
Дуговая сварка 292
Особые способы сварки 298
Сварка высокопрочного и ковкого чугуна 299
Устранение литейных дефектов 300
Ремонтные работы по восстановлению деталей 301
Литература 302

Глава XI. **Сварка цветных металлов** 303

Контактная сварка алюминиевых и магнитных сплавов (канд. техн. наук *Н. Г. Чирлошников*) 303
Точечная и роликовая сварка 303
Стыковая сварка алюминиевых сплавов 321
Сварка бериллия (канд. техн. наук *В. Н. Крыжовский*) 325
Сварка меди и медных сплавов (д-р техн. наук *В. В. Фролов*, инж. *А. Н. Нарцев*) 325
Основные свойства и особенности сварки 325
Основные способы сварки 331
Сварка серебра и биметалла сталь-серебро (инж. *С. Н. Бережницкий*) 338
Литература 340

Глава XII. **Сварка тугоплавких металлов и их сплавов** 343

Общие сведения (канд. техн. наук *О. Н. Стеклов*) 343
Титан и его сплавы (канд. техн. наук *О. Н. Стеклов*) 346
Основные свойства и особенности сварки 346
Способы, техника и технология сварки 350
Цирконий, гафний, ванадий, ниобий, тантал, хром, молибден, вольфрам, (канд. техн. наук *Н. Н. Лепетов*) 370
Литература 381

Глава XIII. **Сварка пластмасс** (д-р техн. наук *П. А. Ольшанский*, д-р техн. наук *А. В. Морозов-цева*) 383

Общие сведения о свариваемости 383
Сварка газовыми теплоносителями 386
Сварка нагретым инструментом 392
Сварка трением 395
Сварка токами высокой частоты 396
Сварка ультразвуком 399
Ядерная сварка 401
Сварка инфракрасным излучением (ИК-сварка) 401
Литература 401

Глава XIV. **Сварка и пайка микроэлементов в радиоэлектронике** (канд. техн. наук *Г. В. Назаров*) 402

Основные способы сварки и пайки радиоэлектронных элементов и схем 402
Способы сварки 402
Способы пайки 402
Монтаж микроэлементов в корпус 405
Герметизация полупроводниковых микроприборов и микросхем 408
Сварка и пайка гибридных тонкопленочных радиоэлектронных схем 408
Соединение микросхем в блоки 410
Контроль качества соединений радиоэлектронных схем 412
Литература 415

ГЛАВА I

КРИТЕРИЙ РАСЧЕТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ СВАРКИ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Применяемые в сварочной технике разнообразные конструкционные материалы должны удовлетворять не только определенным требованиям службы, но и требованиям технологии сварки.

Для разных групп металлов и сплавов характерны различные специальные требования, обеспечивающие их свариваемость и учитывающие особенности поведения металлов под действием того или иного процесса сварки [6, 10]. В сочетании с требованиями эксплуатации (прочность при статической или динамической нагрузке, при нормальной, низкой или высокой температуре, под действием тех или иных активных сред), эти требования определяют практическую пригодность металла для применения в сварных конструкциях и изделиях.

Общими для сварных соединений всех металлов являются требования обеспечения заданных показателей механических и специальных свойств (например жаропрочность, коррозионная стойкость, термостойкость, износостойкость, хладостойкость и т. д.) при отсутствии нарушений сплошности (трещины, поры и т. д.).

В качестве наиболее типичных примеров требований, необходимых для обеспечения свариваемости, можно привести:

1) ограничение содержания газов и других вредных примесей в основном металле и металле шва или подавление их отрицательного действия за счет дополнительного легирования определенными элементами;

2) стойкость против чрезмерного развития процессов рекристаллизации обработки и роста зерен при сварочном нагреве;

3) относительная легкость релаксации микро- и макроскопических напряжений при сварке и последующей обработке.

Весьма часто требования эксплуатации и требования свариваемости противоречат друг другу. Особенно заметна эта тенденция при сварке сложнолегированных высокопрочных материалов, в которых упрочнение достигается за счет эффектов фазового наклепа и дисперсионного упрочнения. Как правило, чем выше прочность этих материалов, тем труднее при сварке обеспечить равнопрочность сварных соединений основному металлу и избежать образования горячих или холодных трещин.

При выборе критериев для расчетного определения режимов сварки тех или иных металлических материалов необходим строго дифференцированный подход. Он зависит от физико-химических свойств свариваемых материалов и от того, в каких зонах сварного соединения при данном виде или способе сварки возникают опасные дефекты или происходят неблагоприятные изменения структуры и свойств.

Однако несмотря на значительное разнообразие свойств и их изменений при сварке, все металлические материалы удобно разбить на три основные

группы в зависимости от наличия полиморфного превращения и величины его объемного эффекта.

I. Металлы и сплавы с большим объемным эффектом полиморфного превращения.

II. Металлы и сплавы с малым объемным эффектом полиморфного превращения.

III. Металлы и сплавы без полиморфных превращений.

При сварке материалов первых двух групп наиболее существенные изменения свойств и структуры могут происходить вследствие как полиморфных превращений (в особенности мартенситного типа) или эвтектоидного распада, так и распада пересыщенных твердых растворов (старение закаленных высокотемпературных фаз, отпуск мартенсита). Однако если в первой группе из-за высокого объемного эффекта полиморфного превращения ведущими в формировании структуры и свойств, как правило, являются мартенситное полиморфное превращение и отпуск мартенсита, то для второй группы — кристаллизация, эвтектоидный распад и старение закаленных высокотемпературных фаз.

При сварке материалов третьей группы главную роль играют процессы кристаллизации (в особенности эвтектической), рекристаллизации и старения. Общим для материалов второй и третьей групп является невозможность исправления грубой кристаллической структуры металла шва и рекристаллизованной структуры околошовной зоны путем последующей термообработки из-за малого объемного эффекта полиморфного превращения или вообще из-за отсутствия фазовой перекристаллизации.

Ниже приводятся принципы выбора критериев для расчетного определения режимов сварки плавлением разнообразных конструкционных материалов. Сами методы расчета режимов сварки здесь не рассматриваются, так как они были изложены в первом томе настоящего справочника и специальной литературе [7, 8, 11].

МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ С БОЛЬШИМ ОБЪЕМНЫМ ЭФФЕКТОМ ПОЛИМОРФНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ

К материалам с большим объемным эффектом полиморфного превращения относят в первую очередь стали перлитного и мартенситного классов, а также сплавы циркония, олова и т. д.

Выбор режимов и технологии сварки сталей определяется типом конструкции, условиями ее эксплуатации и характером термической обработки до и после сварки. Последний фактор является решающим при постановке требований к регулированию структуры и механических свойств соединений при сварке. Все многообразие вариантов этих требований можно свести к четырем основным случаям [11]:

1. Сталь применяется в состоянии после прокатки и не подвергается термической обработке после сварки. К таким сталям относят обычные малоуглеродистые и простейшие строительные низколегированные стали некоторых марок, не подверженные сколько-нибудь существенной закалке при сварке. Свойства сварных соединений таких сталей в основном определяются степенью развития рекристаллизационных процессов и огрубления структуры околошовной зоны и шва. Режимы их сварки выбирают по скорости охлаждения w внутри некоторого оптимального интервала $\Delta w_{опт}$, который обычно устанавливают по данным валиковой пробы [6, 8, 10], исходя из того, чтобы ударная вязкость в зоне термического влияния при отрицательных эксплуатационных температурах не была ниже 3 $кГ\cdot м/см^2$. При этом к основному металлу приходится предъявлять требования ограничения содержания газов ($<0{,}005\%$ O, $<0{,}005\%$ N и $<0{,}0005\%$ H) во избежание старения и снижения сопротивляемости хрупкому разрушению. Для предупреждения образования горячих трещин в этих сталях ограничивают

содержание серы и некоторых других вредных примесей, при этом соотношение $\frac{Mn}{S}$ должно быть $\geqslant 22$ (при 0,06—0,11% C), $\geqslant 30$ (0,11—0,125% C), $\geqslant 60$ (0,15—0,16% C).

2. Сталь перед сваркой подвергается термической обработке на высокую прочность (нормализация или закалка с высоким отпуском). После сварки предусматривается отпуск для снятия напряжений и выравнивания механических свойств в различных участках соединений. К сварным соединениям предъявляется требование равнопрочности с основным металлом в сочетании с определенным уровнем ударной вязкости, пластичности и ряда специальных свойств, характеризующих работоспособность соединений в соответствующих эксплуатационных условиях (например, критическая температура хрупкости и сопротивляемость хрупкому разрушению в условиях ударных или статических нагрузок при низких температурах; пределы длительной прочности и ползучести, сопротивляемость локальному разрушению при повышенных температурах и сложном напряженном состоянии и т. д.).

В этом случае при технологических расчетах следует исходить из необходимости соблюдения двух противоречивых условий:

1) предупреждения образования холодных трещин в околошовной зоне и шве в процессе сварки и при последующем хранении изделий до отпуска;

2) обеспечения наименьшего возможного разупрочнения основного металла в участке высокого отпуска зоны термического влияния.

Для выполнения второго условия сварку нужно вести по возможности на жестких режимах, т. е. при минимальных длительностях пребывания основного металла в этом участке зоны выше температуры отпуска до сварки. Однако это практически удается обеспечить только при относительно высоких скоростях нагрева и охлаждения. Поэтому в качестве основного критерия расчета параметров технологии и режимов наиболее производительных методов однопроходной и многослойной сварки длинными участками следует принимать предельно допустимую скорость охлаждения w_∂, гарантирующую отсутствие трещин в околошовной зоне и шве.

Обычно w_∂ устанавливают по данным для околошовной зоны, так как металл шва благодаря применению менее легированного (в особенности по углероду) присадочного металла обладает более высокой сопротивляемостью образованию холодных трещин.

Предельно допустимая скорость охлаждения околошовной зоны w_∂ и соответствующая ей длительность $t' + t''$ пребывания металла выше температуры Ac_1 при нагреве (t') и охлаждении (t'') устанавливаются по данным сварки жестких проб, наилучшим образом воспроизводящих тип соединений и уровень напряжений в данной сварной конструкции. w_∂ для сталей с повышенным содержанием углерода следует выбирать в зависимости от реакции стали на термический цикл:

а) по допустимому содержанию мартенсита в околошовной зоне [перлитные стали со средней устойчивостью аустенита, у которых при сварке можно регулировать структурное состояние и свойства (рис. 1, стали группы *б*)]; б) исходя из обеспечения достаточно полного развития процессов самоотпуска мартенсита в процессе охлаждения при однопроходной сварке или процессов отпуска при многослойной сварке [стали с высокой устойчивостью аустенита, практически не изменяющие свое структурное состояние и свойства в околошовной зоне при простом термическом цикле (см. рис. 1; стали группы *а* преимущественно с бейнитной структурой и группы *в* с мартенситной структурой)]. При сварке сталей с пониженным содержанием углерода w_∂ целесообразно выбирать весьма высокой, так как образование трещин в них удается предупреждать за счет резкого ограничения роста зерен. При этом одновременно отсутствует и разупрочнение основного металла в зоне отпуска.

При сварке сталей со средней устойчивостью аустенита выбранный по w_∂ режим часто требует корректировки с целью получения заданных механических

свойств. В этом случае дополнительным критерием служит интервал скоростей охлаждения $\Delta w_{опт}$, в котором обеспечиваются оптимальные механические свойства в околошовной зоне и в других участках соединения до и особенно после отпуска. Интервал $w_{опт}$ устанавливается по методикам ИМЕТ-1, валиковой пробы или непосредственно на сварных соединениях [11].

Если предельно допустимую скорость охлаждения не удается обеспечить без подогрева или без перехода на сварку участками, то для уточнения параметров режимов и технологии сварки необходимы специальные исследования влияния длительности $t_{эп}$ на разупрочнение основного металла в процессе сварки, например, с помощью методики ИМЕТ-1 или на сварных соединениях [11].

К числу сталей, сварные соединения которых должны быть после отпуска равнопрочны основному металлу, относят: а) теплоустойчивые низколегированные (12МХ, 35ХМ, 35ХМФ, 35ХВФ) и среднелегированные стали типа ЭИ415 (20Х2, 5МВФ, 20Х2МФ); б) жаропрочные стали с 11—13% Cr; в) высокопрочные низколегированные (30ХГСА, 25ХГФА) и среднелегированные стали типа ЭИ659 (22Х2, 5НВФ), ЭИ712 (13-17Х3НВФ) и т. д.

3. Сталь перед сваркой подвергается термической обработке (нормализация, закалка с отпуском). После сварки отпуск исключен из-за крупных габаритов конструкций. По характеру эксплуатационной нагрузки (например

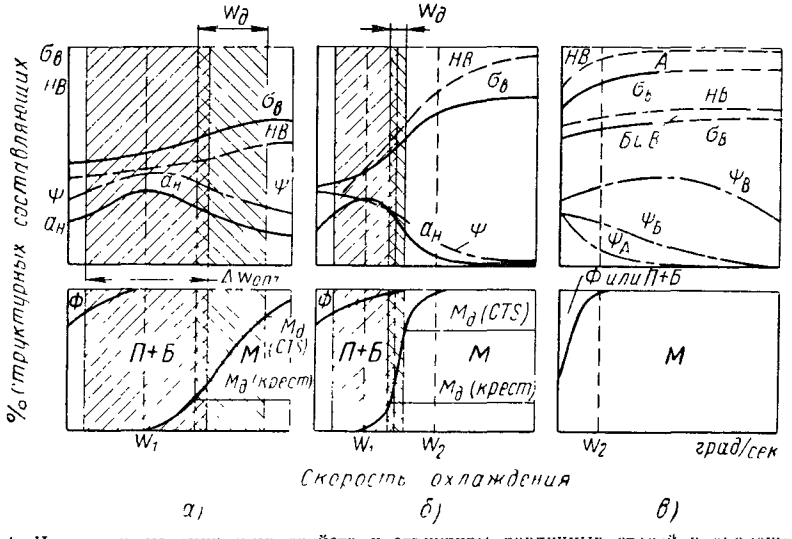


Рис. 1. Изменение механических свойств и структуры различных сталей в околошовной зоне при сварке в зависимости от длительности $t' + t''$ пребывания выше Ac_1 и скорости w охлаждения. $\Delta w_{опт}$ — интервал изменения скорости охлаждения, которому соответствуют оптимальные свойства; $w_д$ — допустимая скорость охлаждения по данным сварки жестких проб, применяемых для оценки условий образования холодных трещин (схема). *а* — малоуглеродистые среднелегированные хромистые стали (0,1—0,15% С, 2—4% Cr) с повышенной устойчивостью аустенита, при сварке которых преобладает перлитное и особенно бейнитное превращение, например 12МХ (10—13)Х(2,5—3)ВФ), (10—12)Х(2—3)НМВФ (12—15)Х3,5ГВФБ, (0,8—10)Х(3—4)ГНВФБ, 0,8Х12, *б* — низколегированные стали с малым (до 0,2%) и средним (до 0,45%) содержанием углерода, обладающие соответственно малой и средней устойчивостью аустенита, например 45, 40Х, 23Г, (20—30)ХГС, 25Н3, 12ХН2, 36СГН, 20Х(2—2,5)МВФ, 15ХМ(ВФ), *в* — низко- и среднелегированные с повышенным содержанием углерода, обладающие высокой устойчивостью аустенита при сварке [подгруппа А, например 40ХГСА, 40ХГСЛМТА, 40ХМА, 40ХНМТА, (30—42)ХГСНМ(В), 43Х3СНМВФ, 25Х11М3ФЛ, и высоколегированные хромистые стали (11—13% Cr) мартенситного класса без никеля и с 0,1—0,25% С [подгруппа Б, например, (10—20)Х13, 15Х11МФ, 15Х11МВБ] и с никелем и 0,1—0,15% С (подгруппа *В*, например, 15Х12НМВФ, 13Х12Н2МФ — см. табл. 1)

ного ударного удар при нормальных и отрицательных температурах) решающим является требование высокой сопротивляемости сварных конструкций хрупкому разрушению. Жестких требований к равнопрочности сварных соединений основному металлу в условиях статического нагружения не предъявляется.

В этом случае регулирование структуры и механических свойств сварных соединений должно осуществляться целиком в процессе сварки. При расчетах технологии и режимов сварки следует исходить не только из условия предупреждения образования холодных трещин без отпуска, но и из необходимости обеспечения оптимального соотношения механических свойств металла околошовной зоны (для предупреждения охрупчивания вследствие закалки, роста зерен и перегрева), в зоне отпуска (для предупреждения отпускной хрупкости) и шве непосредственно после сварки.

Для выполнения этих условий в качестве основного критерия расчета параметров технологии и режимов однопроходной и многослойной сварки длинными участками принимают скорость охлаждения w околошовной зоны, выбираемую в зависимости от толщины металла и конструкции соединения внутри интервала скоростей $\Delta w_{опт}$ (и соответствующих им длительностей $t' \div t''$), в котором обеспечивается оптимальное сочетание механических свойств зоны термического влияния и шва. Для предупреждения опасности образования холодных трещин w должна назначаться с учетом w_0, которая в зависимости от типа стали и жесткости сварного соединения может в большей или меньшей мере ограничивать диапазон приемлемых скоростей охлаждения внутри интервала $\Delta w_{опт}$ — см. группы сталей *а* и *б* на рис. 1. Значения $\Delta w_{опт}$ и w_0 устанавливают методами, указанными в п. 2.

К числу сталей, к которым предъявляют эти требования, относятся низколегированные стали 12Х1Н2, 25Н3, 36СГНА, 18Х2ВФ, 20НГМ, 23Г, 20ХГС, 35ХГСА, 40Х, а также сталь 45.

1. Стали перед сваркой подвергаются отжигу, а после сварки — полной термической обработке (закалка и низкий отпуск) на сверхвысокую прочность — до 150—200 $кГ/мм^2$. Требования к сварным соединениям такие же, как и в п. 2. К этой группе сталей относятся стали с высокой устойчивостью аустенита — низколегированные с повышенным содержанием углерода (35ХГСА, 40ХГСА, 40ХГСНМТА, 45ХМА; 45ХНМГА), с 2—3% Cr (30Х2ГСНВМ, 42Х2ГСНМ, 43Х3СНМФА) и 12% Cr (15Х12НМВФА). Стали применяются для изделий малой толщины, которые сваривают преимущественно в один – три прохода. Параметры режимов сварки следует выбирать по скорости охлаждения околошовной зоны w_0, гарантирующей отсутствие холодных трещин при сварке и в течение вылеживания изделий до отпуска или полной термообработки.

Значения критериев w_0 и $\Delta w_{опт}$ для сталей различных марок приведены в табл. 1 (см. стр. 12–21).

МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ С МАЛЫМ ОБЪЕМНЫМ ЭФФЕКТОМ ПОЛИМОРФНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ

В этом разделе рассмотрены принципы выбора технологии и режимов сварки α- и α – β-сплавов титана, как наиболее распространенных в этой группе. Сплавы титана, как и стали, претерпевают в процессе обработки по термическому циклу сварки полиморфные превращения, однако если в железе $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение сопровождается увеличением удельного объема на 3%, то в титане $\beta \rightarrow \alpha$ превращение имеет практически неощутимый объемный эффект противоположного знака (уменьшение удельного объема на 0,13%) [11].

Титан и его сплавы находят широкое применение для ответственных сварных конструкций, работающих как при повышенных, так и отрицательных

1. Изменение механических свойств околошовной зоны при однопроходной сварке в зависимости от скорости охлаждения и критерии выбора режимов сварки сталей (данные методики НИИСТ-1, валиковой пробы, пробы СТС и крестовой пробы)

Марка стали	Тип диаграммы 1 на рис. 1	Механические свойства околошовной зоны при 20° С (средние по данным испытаний пяти образцов НИИСТ-1) в зависимости от скорости охлаждения w в интервале 600—500° С								$\Delta w^*_{опт}$ в *град/сек*	$\frac{M^{**}}{HB}$	w_0^{***}	M_0^{***}	HB^{***}
45	*а*	w	0,1	2,6	13	24	70	600	Исходное состояние	2,0—4,0 ($a_н$ ≥ 3,5 кГм/см², $a_{0,025}$ ≥ 2 кГм/см² при 20° С, валиковая проба)	$\frac{0—5}{230—270}$	15 8	80 30	$\frac{400}{375}$
		НВ	175	230	386	460	555	605	190					
		$\sigma_в$	70	90	104	150	172	—	82					
		ψ	25	21	19	7	4	0	35					
23Г	*б*	w	0,07	1,5	9,5	20	30	600	Исходное состояние	2,5—70 ($a_н$ ≥ 3,5 кГм/см², $a_{0,025}$ ≥ 3 кГм/см² при 20° С, валиковая проба)	$\frac{5—100}{220—440}$	$\frac{17}{6}$	$\frac{90}{45}$	$\frac{422}{320}$
		НВ	152	198	375	433	447	470	191					
		$\sigma_в$	105	108	150	188	190	200	120					
		ψ	47	42	29	24	18	11	37					
		φ	180	180	83	55	42	15	180					
12Х1Н2	*б*	w	0,060	1,5	10	20	30	600	Исходное состояние	0,8—50 ($a_н$ ≥ 3 кГм/см², $a_{0,025}$ ≥ 3,5 кГм/см² при 20° С, валиковая проба)	$\frac{0—100}{215—420}$	$\frac{35}{24}$	$\frac{90}{77}$	$\frac{410}{390}$
		НВ	210	280	320	380	400	460	290					
		$\sigma_в$	110	115	133	168	173	207	112					
		ψ	85,0	58	57	24,5	24	15,5	53					
		φ	180	180	180	167	50	30	180					
25Н3	*в*	w	0,06	3	9	22	32	600	Исходное состояние	0,8—70 ($a_н$ ≥ 3 кГм/см², $a_{0,025}$ ≥ 3,5 кГм/см² при 20° С, валиковая проба)	$\frac{0—100}{175—415}$	$\frac{30}{24}$	$\frac{90}{85}$	$\frac{463}{435}$
		НВ	110	270	340	430	452	490	260					
		$\sigma_в$	90	106	121	163	175	188	102					
		ψ	54	54	26	20	11	10	40					
		φ	180	180	170	40	40	0	180					
		$a_н$	9,0	11	8,0	6	5,5	5,2	17					
36СГНА	*в*	w	0,08	1,1	10	22	30	600	Исходное состояние	2—18 ($a_н$ ≥ 3,5 кГм/см², $a_{0,025}$ ≥ 2 кГм/см² при 20°, валиковая проба)	$\frac{25—80}{330—470}$	$\frac{17}{7}$	$\frac{90}{70}$	$\frac{495}{460}$
		НВ	285	320	460	545	560	600	260					
		$\sigma_в$	130	138	178	220	225	0	115					
		ψ	0	8	5	4,0	0	0	18					
		φ	180	65	12	8	5	0	180					

20ХГСА	б	w	1,6	4	9	17	30	600	Исходное состояние	1,6 –70 (ψ ≥ 25%, ИМЕТ 1)	0 –100 / 250 – 420	— / 6	— / 30	— / 360
		HB	250	201	320	350	400	470	160					
		$\sigma_в$	94	104	115	147	161	197	61					
		ψ	38	37	36,5	36	25	20	45					
20ХГС	б	w	0,06	2	10	20	30	600	Исходное состояние	7—70 ($a_н$ ≥ ≥ 5 кГм/см², $a_{0,025}$ ≥ 3,5 кГм/см² при 20° С, валиковая проба)	0—100 / 350—440	12 / 6	65 / 35	440 / 360
		HB	270	289	390	450	465	518	201					
		$\sigma_в$	110	111	185	181	189	192	117					
		ψ	40	31	16	13,5	13	12	39					
		a	180	63	11	6	4	0	160					
30ХГСА	б	w	1,6	4	9	17	30	600	Исходное состояние	1,6 –8,0 (ψ ≥ 22%, ИМЕТ-1)	0—80 / 340—450	— / 2	— / 20	— / 360
		HB	340	341	480	514	525	565	176					
		$\sigma_в$	130	143	175	180	182	188	212					
		ψ	25	22	21	21	19	17	36					
35ХГСА	б	w	0,1	2,5	12	18	37	600	Исходное состояние	1,5—7,0 ($a_н$ ≥ ≥ 5 кГм/см², $a_{0,025}$ ≥ 3,5 кГм/см² при 20° С, валиковая проба)	30—90 / 400—450	5,5 / 2	90 / 70	440 / 390
		HB	293	400	499	510	510	510	306					
		$\sigma_в$	93	116	170	215	218	—	108					
		ψ	30	5,5	4,5	3	1,5	0	33					
40ХГСА	в, А	w	0,06	0,1	1,5	12	20	600	Исходное состояние	0,5 (ψ ≥ 30%, ИМЕТ-1)	≤ 50 / ≈ 380	— / 5	— / 90	— / 494
		HB	220	240	453	510	578	550	200					
		$\sigma_в$	120	115	195	210	215	—	85					
		ψ	23	25	0	0	0	0	50					
40ХГСНМТА	в, А	w	0,02	0,03	1,5	10	30	600	Исходное состояние	0,5 (ψ ≥ 30%, ИМЕТ-1)	40 / 440	— / 5	— / 90	— / 494
		HB	293	300	462	500	470	527	202					
		$\sigma_в$	143	135	180	245	250	—	86					
		ψ	20	18	4	0	0	0	40					

* В скобках указано, по каким свойствам и по какой пробе выбран $\Delta w_{опт}$.

** В числителе — количество мартенсита в %, в знаменателе — твердость в кГ/мм², соответствующие пределам $\Delta w_{опт}$

*** По данным сварки жестких проб в числителе CTS, в знаменателе крестовой

Продолжение табл. 1

Марка стали	Тип диаграммы на рис. 1	Механические свойства околошовной зоны при 20° С (среднее по данным испытаний пяти образцов ИМЕТ-1) в зависимости от скорости охлаждения w в интервале 600—500° С						ΔH_{min}^{*}, кгс/мм²	$\frac{V_{кр}^{**}}{HB}$	$W_{кр}^{***}$	$M_{кр}^{***}$	Hp^{***}
40Х	б	w	0,05	1,8	16	22	32	60	Исходное состояние	4—14 ($\eta_н$ = 2,5 кгс/мм², $a_{0,025}$ = 2,5 кгс/см² при —20° С, ватниковаая проба)	$\frac{75-91}{340-400}$	55	80	$\frac{470}{390}$
		HB	180	140	320	383	600	650	301					
		$\sigma_в$	60	130	333	337	240	—	122					
		ψ	57	13,5	10	5,5	3,4	0	34					
		η	150	100	15	10	6	0	146					
30ХМ	б	w	1	3	12	20	35	600	Исходное состояние	1—8 ($\Psi \geq 2\%$, ИМЕТ-1)	$\frac{0-60}{230-312}$	15	70	$\frac{430}{—}$
		HB	230	212	430	484	604	624	220					
		$\sigma_в$	101	118	160	174	187	—	94					
		ψ	50	26	21	20	15	3	86					
35ХМ	б	w	0,1	0,5	2,2	12	50	600	Исходное состояние	1—6 ($\eta \geq 2\%$, ИМЕТ-1)	$\frac{0-90}{360-420}$	45	45	$\frac{—}{394}$
		HB	240	301	360	520	530	660	225					
		$\sigma_в$	110	116	128	220	235	228	113					
		ψ	17	39	25	13	12	3	45					
35ХМФА	б	w	0,1	0,5	2,0	18	50	600	Исходное состояние	Нет	—	7	60	$\frac{—}{418}$
		HB	209	280	342	550	572	575	302					
		$\sigma_в$	107	114	118	232	238	—	112					
		ψ	10	8	8	8	4	0	32					
45ХМА	a, A	w	0,06	0,1	1,5	12	30	600	Исходное состояние	($\Psi \geq 2\%$, ИМЕТ-1)	$\frac{\leq 70}{\leq 390}$	5	80	$\frac{—}{467}$
		HB	410	321	410	536	542	580	205					
		$\sigma_в$	107	108	118	225	228	—	93					
		ψ	20	30	0	0	0	0	39					
40ХНМФА	a, A	w	0,02	0,08	2	12	30	600	Исходное состояние	($\Psi \geq 0\%$, ИМЕТ-1)	$\leq \frac{45}{\leq 360}$	5	90	$\frac{—}{475}$
		HB	260	290	517	528	533	560	206					
		$\sigma_в$	120	122	150	—	—	—	91					
		ψ	31	30	8	0	0	0	30					

12Х18	*а*	*HB*	1,0	5,5	10	20	35	600	Исходное состояние 131 62 49	Не ограничен ($\psi \geq 40\%$, ИМЕТ-1)	$\frac{0-20}{180-362}$	–	–	–	
		$\sigma_в$	176 71 46	187 84 58	192 83 56	205 89 57	270 95 60	362 142 84							
		ψ													
10Х2,5НФ	*а*	–	1	4,5	10	25	35	600	Исходное состояние 119 60 52	Не ограничен ($\psi \geq 30\%$, ИМЕТ-1)	$\frac{0}{225-323}$	–	–	–	
		HB	350 98 28	362 98 28	372 92 38	374 95 38	390 102 43	322 121 27							
		$\sigma_в$													
		ψ													
12Х3ВФ	*а*	*HB*	1	4,5	10	25	35	600	Исходное состояние 121 64 53	Не ограничен ($\psi \geq 30\%$, ИМЕТ-1)	$\frac{0-10}{305-375}$	–	–	–	
		$\sigma_в$	300 111 37	309 109 34	309 116 34	317 122 34	327 126 34	377 144 40							
		ψ													
11Х2,5НФ	*а*	*HB*	1	4,5	10	22	35	600	Исходное состояние 130 69 49	$5-35$ ($\psi \geq 25\%$, ИМЕТ-1)	$\frac{0}{297-382}$	–	–	–	
		$\sigma_в$	297 108 23	297 109 23	297 111 25	313 122 25	332 124 25	362 139 21							
		ψ													
17Х2,5ВФБ	*б*	*HB*	1	4,5	10	25	35	600	Исходное состояние 145 98 41	$1-25$ ($\psi \geq 25\%$, ИМЕТ-1)	$\frac{0-10}{317-375}$	$\frac{40}{-}$	$\frac{10}{-}$	$\frac{400}{-}$	
		$\sigma_в$	317 119 27	317 121 25	342 130 27	357 135 25	387 142 22	418 146 21							
		ψ													
20Х2,5МФ (ЭИ10)	*б*	*HB*	1	3	–	25	35	600	Исходное состояние 230 98 44	$1-25$ ($\psi \geq 30\%$, ИМЕТ-1)	$\frac{1-10}{310-410}$	25 –	10 –	$\frac{100}{-}$	
		$\sigma_в$	310 130 36	325 134 35	340 142 38	410 163 44	420 170 28	425 171 25							
		ψ													
20Х2,5НФ	*б*	*HB*	1	4,5	10	25	35	600	Исходное состояние 145 69 40	$1-10$ ($\psi \geq 25\%$, ИМЕТ-1)	$\frac{0-10}{320-375}$	17 –	10 –	$\frac{400}{-}$	
		$\sigma_в$	320 122 29	330 128 28	375 140 25	418 147 21	422 155 20	422 151 20							
		ψ													

Продолжение табл. 1

Марка стали	Тип диаграммы на рис 1	Механические свойства околошовной зоны при 20° С (средние по данным испытаний пяти образцов ИМЕТ-1) в зависимости от скорости охлаждения w в интервале 600—500° С								$\Delta w^*_{опт}$ в *град/сек*	$\frac{M^{**}}{HB}$	w^{*} **	M^{***}_{δ}	HB^{***}
20ХМФ	*б*	w	0,1	1,5	4,8	12	30	600	Исходное состояние	1—25 ($\psi \geq 40\%$, ИМЕТ-1)	$\frac{0-30}{270-425}$	15 —	20 —	$\frac{420}{-}$
		HB	240	290	315	420	425	430	235					
		$\sigma_в$	118	141	145	148	167	176	105					
		ψ	3	40	44	43	41	33	54					
11Х2НМВФ	*а*	w	1	4,5	10	25	35	600	Исходное состояние	1—5 ($\psi \geq 25\%$, ИМЕТ-1)	$\frac{0-20}{333-362}$	—	—	—
		HB	333	352	342	352	362	387	146					
		$\sigma_в$	114	134	119	126	131	140	66					
		ψ	38	28	26	26	26	23	47					
13Х2,5НВФ (типа ЭП712)	*а*	w	1	4,5	10	25	35	600	Исходное состояние	То же	$\frac{0}{297-342}$	—	—	—
		HB	297	313	322	342	342	352	158					
		$\sigma_в$	113	118	122	130	130	136	73					
		ψ	26	24	27	25	25	20	31					
12Х3НВФБ	*а*	w	1	4,5	10	25	35	600	Исходное состояние	Не ограничен ($\psi \geq 25\%$, ИМЕТ-1)	$\frac{0-}{315-352}$	—	—	—
		HB	315	315	315	315	322	352	174					
		$\sigma_в$	112	112	114	118	122	132	77					
		ψ	27	30	30	27	26	26	45					
11Х3НВФ	*а*	w	1	4,5	10	25	35	600	Исходное состояние	5—35 ($\psi \geq 25\%$, ИМЕТ-1)	$\frac{0}{285-302}$	—	—	—
		HB	285	285	285	302	302	352	150					
		$\sigma_в$	95	98	99	111	113	125	68					
		ψ	25	35	29	27	25	22	40					
10Х3[illegible] НВФБ	*а*	w	1	4,5	10	25	35	600	Исходное состояние	1—35 ($\psi \geq 25\%$, ИМЕТ-1)	$\frac{0}{297-322}$	—	—	—
		HB	297	305	313	322	322	342	145					
		$\sigma_в$	114	120	123	126	130	139	67					
		ψ	28	27	26	26	25	22	45					

10Х11НВФБ	*а*	*n*	1	4.5	10	25	35	600	Исходное состояние 1,9 68 —	Не ограничен ($\psi \geq 25\%$, ИМЕТ-1)	$\frac{0-30}{322-362}$	—	—	—
		HB	322	333	342	342	352	362						
		$\sigma_в$	117	127	128	131	141	142						
		ψ	26	26	40	37	25	46						
15Х12ВНБФ (типа ЭИ802)	*б*	*n*	1	4.5	10	25	35	600	Исходное состояние 178 70 33	$\frac{n-25}{\psi \geq 25\%}$, ИМЕТ-1)	$\frac{0-10}{342-372}$	—	—	—
		HB	322	362	362	372	387	418						
		$\sigma_в$	121	138	138	142	162	155						
		ψ	18	27	25	25	18	18						
17Х3,5НФБ (типа ЭИ712)	*б*	*n*	1	4.5	10	25	35	600	Исходное состояние 206 88 35	То же	$\frac{0-25}{352-395}$	40 —	25 —	400 —
		HB	333	352	352	395	395	418						
		$\sigma_в$	128	134	134	148	150	155						
		ψ	22	26	26	25	19	18						
22Х3,5НВФ (ЭИ659)	*б*	*n*	1	4.5	10	25	35	600	Исходное состояние 313 121 29	$\frac{1-6}{\psi \geq 2\%}$, ИМЕТ-1)	$\frac{0}{\geq 322}$	10 —	10 —	400 —
		HB	322	322	400	418	418	432						
		$\sigma_в$	124	123	167	175	174	182						
		ψ	36	26	21	18	18	16						
12Х3, ГВФБ	*а*	*n*	1	4.5	10	25	35	600	Исходное состояние 172 79 44	Не ограничен ($\psi \geq 30\%$, ИМЕТ-1)	$\frac{0}{261-309}$	—		—
		HB	283	283	301	309	309	309						
		$\sigma_в$	109	109	112	114	114	121						
		ψ	38	40	38	37	37	30						
13Х3, ГВФБ	*а*	*n*	1	4.5	10	25	35	600	Исходное состояние 146 65 38	Не ограничен ($\psi \geq 30\%$, ИМЕТ-1)	$\frac{0-10}{313-362}$	—	—	—
		HP	313	333	342	342	342	342						
		$\sigma_в$	117	127	137	137	138	142						
		ψ	34	39	36	34	33	22						
15Х3, ГВФ	*а*	*n*	1	4.5	10	25	35	600	Исходное состояние 170 69 38	$\frac{5-15}{\psi \geq 5\%}$, ИМЕТ-1)	$\frac{0-15}{331-352}$	—	—	—
		HB	311	331	332	352	352	362						
		$\sigma_в$	112	115	116	124	127	138						
		ψ	25	32	32	28	27	22						

Продолжение табл. 1

Марка стали	Тип диаграммы растяжения	Механические свойства околошовной зоны при 20° С (средние по данным испытаний шести образцов ПМЕТ-1) в зависимости от скорости охлаждений w в интервале 600—500° С							$\Delta w^*_{отп}$ в градусах	$\frac{V^{**}}{HB}$	w_0^{***}	M_0^{***}	HB^{***}
08Х3,5ГНВФ	a	w	1	4,5	10	25	35	600	Исходное состояние	Не ограничен ($\Psi \geq 30\%$, ПМЕТ-1)	$\frac{0 \quad 10}{277-311}$	—	—	—
		HB	277	277	277	277	277	311	140					
		$\sigma_в$	93	95	98	100	102	120	63					
		Ψ	32	35	38	34	33	11	38					
10Х3ГНВФЛ	a	w	1	4,5	10	25	35	600	Исходное состояние	Не ограничен ($\Psi \geq 30\%$, ПМЕТ-1)	$\frac{0 \quad 10}{311-342}$	—	—	—
		HB	313	317	322	322	322	342	153					
		$\sigma_в$	123	125	128	128	130	138	68					
		Ψ	31	30	29	28	28	26	46					
30ХГСНВМ	c, A	w	0,08	1,5	5	12	45	600	Исходное состояние	—	—	—	—	—
		HB	350	482	490	510	530	560	240					
		$\sigma_в$	136	210	218	220	235	—	110					
		Ψ	28	20	20	20	20	0	17					
13ХГНВФБ	c	w	1	4,5	10	25	45	600	Исходное состояние	$1 - \frac{\Psi}{50}$ ($\Psi \geq 50\%$, ПМЕТ-1)	$\frac{0 \quad 10}{342}$	—	—	—
		HB	342	342	342	342	342	430	222					
		$\sigma_в$	124	127	136	138	141	147	120					
		Ψ	25	25	25	25	21	18	27					
45ХГСНМ	c, A	w	0,1	1,5	12	45	100	600	Исходное состояние	—	—	—	—	—
		HB	337	483	513	543	556	560	290					
		$\sigma_в$	110	230	240	230	—	-	80					
		Ψ	35	15	15	8	0	0	17					

40Х13	$\sigma_в$, A	w	0,08	1,0	5	1,0	40	600	Исходное состояние	—	—	—	—
		HB	430	363	600	606	602	607	320				
		$\sigma_в$	190	210	—	—	—	—	202				
		ψ	7	2	0	0	0	0	87				
15Х12ВНМФА (ЭИ802А)	$\sigma_в$, B	w	0,2	1,2	5,0	12	90	600	Исходное состояние 23 80 91	Не ограничен	$\frac{\sim 100}{420-460}$	—	—
		HB	420	401	590	455	455	475					
		$\sigma_в$	140	167	170	170	168	168					
		ψ	57	60	46	60	45	45					
08Х12	σ	w	0,1	1,0	5	10	60	600	Исходное состояние 156 69 62	Не ограничен ($\psi \sim 18-20\%$, ИМЕТ-1)	$\frac{0}{127-220}$	—	—
		HB	127	178	182	196	210	220					
		$\sigma_в$	69	83	86	89	95	100					
		ψ	87	82	80	84	85	78					
10Х13	$\sigma_в$, b	w	0,1	1,0	5	10	60	600	Исходное состояние 192 120 46	Не ограничен ($\psi \sim 17\%$, ИМЕТ-1)	$\frac{0-100}{\sim 180}$	$\frac{5}{100}$	$\frac{380}{—}$
		HB	320	375	397	400	422	391					
		$\sigma_в$	161	162	160	152	140	150					
		ψ	17	17	17	22	25	28					
20Х13	$\sigma_в$, b	w	0,1	1,0	5	10	60	600	Исходное состояние 160 80 43	Нет	—	—	—
		HB	387	480	490	480	495	494					
		$\sigma_в$	188	198	207	206	210	210					
		ψ	5	7	16	26	30	7					

Продолжение табл. 1

Марка стали	Тип диаграммы на рис. 1		Механические свойства околошовной зоны при 20° С (средние по данным испытаний пяти образцов ИМЕТ-1) в зависимости от скорости охлаждения w в интервале 600–500° С						$\Delta w_{опт}^{*}$ в сравнении	$\frac{M^{**}}{HB}$	$v_0^{*,**}$	V_0^{**}	HB^{**}
15Х11МФ	$\sigma_в$, Б	w	0,1	1,0	4,2	15	40	600	Исходное состояние	$\frac{0-100}{30,}$	$\frac{5}{-}$	$\frac{100}{-}$	$\frac{390}{-}$
		HB	385	380	388	390	395	400	420				
		$\sigma_в$	150	150	148	166	167	167	88				
		ψ	28	22	20	18	21	10	42				
15Х11ВФ	$\sigma_в$, Б	w	0,1	0,6	3	15	40	600	Исходное состояние	$\frac{0-100}{\geq 105}$	$\frac{5}{-}$	$\frac{100}{-}$	$\frac{390}{-}$
		HB	260	333	363	390	392	390	210				
		$\sigma_в$	148	160	165	164	166	164	98				
		ψ	5	17	18	18	20	4	47				
15Х11МФБ (ЭИ800)	$\sigma_в$, Б	w	0,1	1,0	4,5	15	40	600	Исходное состояние	$\frac{0}{\geq 120}$	$\frac{40}{-}$	$\frac{100}{-}$	$\frac{390}{-}$
		HB	240	302	336	337	321	320	240				
		$\sigma_в$	120	140	165	164	163	162	114				
		ψ	20	18	17	16	17	6	35				
25Х11МФ (ЭИ801)	$\sigma_в$, Б	w	0,1	0,6	3	15	40	600	Исходное состояние	—	—	—	—
		HB	440	440	443	448	446	448	220				
		$\sigma_в$	170	166	168	168	166	166	120				
		ψ	5	5	5	5	5	5	30				
13Х12Н2МФ	$\sigma_в$, Б	w	0,1	1,0	1,5	38	100	600	Исходное состояние	$\frac{\sim 9,}{420-440}$	—	—	—
		HB	426	428	430	440	430	425	—				
		$\sigma_в$	151	153	159	155	152	144	100				
		ψ	41	52	52	52	48	40	52				

15Х12ВМФ (ЭИ802)	*а, Б*	*w*	0.1	1.0	3	15	45	600	Исходное состояние	(ф $\frac{R}{R_0} \geq 2$ 12%, ИМЕТ-1)	$\frac{0-100}{\geq 195}$	25 —	$\frac{100}{}$	— —
		НВ	260	360	370	380	380	390	225					
		$\sigma_в$	150	170	170	168	169	168	111					
		ψ	22	15	13	12	12	6	32					
1Х12ВМФ с T_1, Х и В (ЭИ803)	*а, Б*	*w*	0.1	0.3	3	15	30	600	Исходное состояние	Нет	—	—	—	—
		НВ	400	475	474	472	474	462	300					
		$\sigma_в$	148	156	160	164	162	165	93					
		ψ	21	12	12	12	8	7	39					

Примечания. 1. Параметры термических циклов околошовной зоны на ветви нагрева, принятые при испытании образцов ИМЕТ-1: скорость нагрева $w_н = 150 - 250$ *град/сек*, максимальная температура нагрева $T_m = 1350°$ С, радиус оправки при изгибе был равен толщине образцов (3 мм), надрез при испытании на удар имел радиус 1 мм и глубину 1 мм.

2. Образцы ИМЕТ-1 из сталей 40ХГСА, 45ХМА, 45ХНМТА, 40ХГСНМТА, 30Х2ГСНВМ, 42Х2ГСНМ, 43Х3СНМФА, 3ХВФА и 3ХМФА испытывали на растяжение в стандартных машинах, а образцы всех остальных сталей — в машине ИМЕТ-1, в последнем случае из-за более высокой скорости деформации (80–100% в 1 сек на базе 10 мм) ψ на 20–50% ниже, а $\sigma_в$ на 30—40% выше, чем в первом, прочерки в графе *при высоких* w_0 поставлены из-за резкого падения прочности в связи с растрескиванием.

3. Значения w_0 приведены для сталей 40ХГСА, 45ХМА, 40ХГСНМТА и 45ХНМТА при условии сопутствующего подогрева не ниже 250° С, для стали типа Х12 — предварительного подогрева не ниже 200° С, для сталей 40Х, 35ХГСА и 30ХГСА не ниже 100° С, все стали, для которых w_0 не указана, практически не склонны к образованию трещин в пределах $\Delta w_{опт}$, для сталей 30Х2ГСНВМ, 42Х2ГСНМ и 43Х3СНМФА $\Delta w_{опт}$ и w_0 не указаны, так как их сваривают в отожженном состоянии с последующей полной термообработкой, при сварке на морозе (—45° С) для сталей 12ХН2, 20НГМ и 25Н3 $w_н$ должна быть снижена до 6—7 *град/сек*.

температурах в условиях сложного напряженного состояния. В зависимости от назначения к ним предъявляют такие же разнообразные требования, как и для конструкций из сталей повышенной и высокой прочности.

С точки зрения требований к регулированию механических свойств сварных соединений целесообразно рассмотреть два основных случая [11].

1. Сплавы применяют в состоянии после прокатки или отжига. Упрочняющую термообработку после сварки не проводят. Для изделий с жесткими соединениями назначают отжиг с целью снятия напряжений. К этим сплавам относятся технический титан и его α- и α + β-сплавы мартенситного класса, упрочнение которых достигается целиком за счет легирования α твердого раствора. Сочер

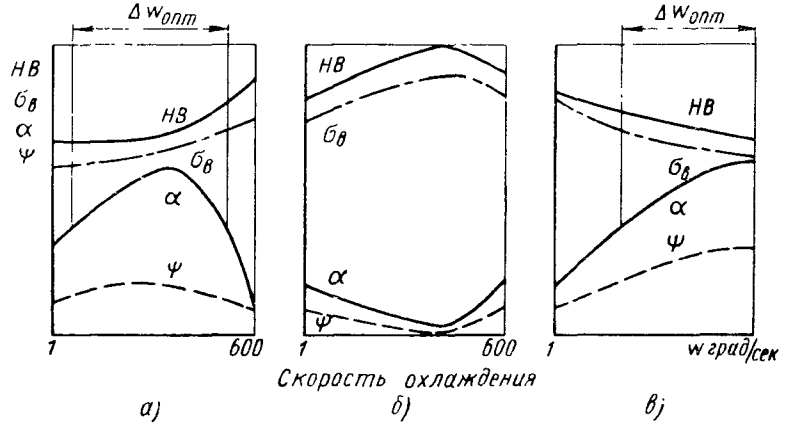


Рис. 2. Изменение механических свойств сплавов титана в околошовной зоне при сварке в зависимости от длительности $t' + t''$ пребывания выше температуры α → β-превращения и скорости охлаждения w_0 (схема): *а* — технический титан ВТ1, α-сплавы с Al (3,7% Al, ВТ5, ВТ5-1), α + β-сплавы АТ3—АТ8, ОТ4-1, ОТ4-2, ВТ6С с весьма малым количеством β-фазы; *б* — сплавы со структурой α′ и β-фаз при малом и среднем количестве β-фазы (ВТ6, ВТ14); *в* — сплавы со структурой β → α + α′-фаз при повышенном и высоком содержании β-фазы (ВТ16, ВТ15) — см. табл. 2.

жание β-стабилизаторов в этих α + β-сплавах ниже или несколько выше пределов их растворимости в α фазе (см. группу *а* на рис. 2).

Структура и свойства сварных соединений этих сплавов целиком определяются процессом сварки. Поэтому основным критерием выбора режимов и технологии сварки является интервал скоростей охлаждения $\Delta w_{опт}$, в котором степень снижения уровня пластических свойств и ударной вязкости околошовной зоны и шва в сравнении с основным металлом оказывается наименьшей. Если сплавы применяются в деформированном состоянии и после сварки отжигу не подвергаются, то в связи с опасностью резкого разупрочнения дополнительным критерием служит длительность t_p пребывания основного металла шва выше температуры рекристаллизации обработки в участке зоны термического влияния, нагреваемом до температуры начала α → β-превращения. При содержании до 4—4,5% Al и β-стабилизаторов не выше предела растворимости в α фазе эти сплавы имеют достаточно широкий интервал $\Delta w_{опт}$. Наиболее высокими характеристиками пластичности сварные соединения этих сплавов обладают при средних или относительно высоких скоростях охлаждения, соответствующих режимам аргоно-дуговой сварки металла средней или малой толщины. При мягких режимах пластичность снижается вследствие роста зерна и перегрева металла в околошовной зоне, а при весьма жестких режимах — за счет образования более резких закалочных α′-структур.

Уровень пластических свойств сварных соединений этих сплавов и ширина интервала $\Delta w_{опт}$ существенно зависят от содержания газов, алюминия, типа и количества β-стабилизаторов. Особенно резко пластичность падает при высоком содержании алюминия (сплавы ОТ4-2, ВТ6, АТ8).

Для повышения сопротивляемости сплавов титана замедленному разрушению (образованию холодных трещин) рекомендуется ограничивать содержание газов в основном металле $\leqslant 0{,}1-0{,}15\%$ O_2 и $N \leqslant 0{,}005-0{,}008\%$ H) и вводить в него и металл шва $1-3\%$ циркония, подавляющего отрицательное влияние кислорода [11].

2 Сплавы применяют в состоянии после упрочняющей термообработки (закалка и старение). Перед сваркой основной металл подвергают закалке или отжигу, а после сварки — закалке и старению. К этой группе относятся сплавы с α + β-структурой.

Основным критерием выбора режимов и технологии сварки α + β-сплавов также является интервал $\Delta w_{опт}$. Однако он назначается не только исходя из целесообразности получения максимальных пластических свойств соединений после сварки за счет благоприятного соотношения структурных составляющих, что необходимо в связи с операциями правки до полной термообработки. В ряде случаев из-за низкой пластичности шва и околошовной зоны после сварки изделия перед правкой приходится подвергать отжигу или закалке в зависимости от состава сплавов. Выбор этого интервала должен быть обоснован также и с точки зрения обеспечения требуемой прочности, пластичности и ряда специальных свойств соединений после закалки и старения. При высоком содержании β-стабилизаторов в сплаве интервал $\Delta w_{опт}$ следует выбирать так, чтобы химическая и физическая неоднородность сварных швов и околошовной зоны была минимальна. Здесь имеется в виду внутрикристаллическая неоднородность в металле шва при кристаллизации, рост зерна в шве и околошовной зоне, обогащение пограничных областей зерен, субзерен и фрагментов легирующими элементами и другие процессы, приводящие к резкому снижению дисперсности продуктов старения, т. е. выделений α-фазы и интерметаллических соединений. Кроме того, для получения по возможности равномерных механических свойств во всех участках сварного соединения необходимо ограничивать старение основного металла в процессе сварки в участке зоны термического влияния, который нагревается до температур интенсивного старения. Обычно эти требования выполняются при сварке на весьма жестких режимах.

На рис. 2 сплавы с α + β-структурой разделены на две группы: *б* и *в* — в зависимости от количества β-фазы. Сварные соединения сплавов группы *б* с малым и средним количеством остаточной β-фазы [ВТ6, ВТ14 (Б), ВТ14 (А), ВТ14] характеризуются резким снижением пластических свойств в широком интервале средних скоростей охлаждения вследствие неблагоприятного соотношения α'- ω- и β-фаз. Ширина этого интервала зависит от количества β-стабилизаторов. Вне этого интервала пластичность несколько повышается: при малых скоростях охлаждения вследствие снижения количества β-фазы, а при высоких скоростях — наоборот, за счет ее увеличения. Для правки изделий из этих сплавов после сварки необходим отжиг на α фазу. После закалки и старения пластичность соединений практически не возрастает.

К сплавам группы *в* отнесены высоколегированные α + β сплавы с высоким содержанием β фазы (ВТ16) или со структурой метастабильной β-фазы (ВТ15). Высокое содержание β-фазы в околошовной зоне и шве обеспечивает высокую пластичность сварных соединений указанных сплавов непосредственно после сварки на средних и жестких режимах. Благодаря этому они легко подвергаются правке. У более легированного сплава ВТ15 $\Delta w_{опт}$ значительно более широкий, чем у сплава ВТ16. Вне интервала $\Delta w_{опт}$ (при малых скоростях охлаждения) пластичность падает из-за появления α- и α'-фаз. Резкое снижение пластичности сварных соединений этих сплавов (особенно ВТ15) после старения связано с химической неоднородностью структуры. Рекомендуемые значения $\Delta w_{опт}$ для различных сплавов титана приведены в табл. 2.

2. Изменение механических свойств околошовной зоны при однопроходной сварке сплавов титана в зависимости от скорости охлаждения и оптимальные интервалы скорости охлаждения (данные методики ИМЕТ-1)

Марка сплава и толщина листов	Механические свойства околошовной зоны при 20° С (средние по данным испытаний пяти образцов) в зависимости от скорости охлаждения w в интервале 1000—800° С							$\Delta w^*_{опт}$ в *град/сек*
ВТ1 (2 мм)	w	1	20	60	—	600	Исходное состояние	3–400 ($\psi > 36\%$),
	HB	230	210	207	—	234	180	
	$\sigma_в$	53	57	58	—	69	56	1–500
	ψ	24	38	46	—	29	50	($\psi > 25\%$)
Ti 3,7% Al (45 мм)	w	1,3	8	20	150	600	Исходное состояние	4–500 ($\psi > 25\%$, $\varphi > 60°$)
	HB	240	242	245	260	300	275	
	$\sigma_в$	92	90	88	98	103	99	
	ψ	20	27	30	30	25	25	
	φ	62	66	70	78	58	50	
ВТ5 (5% Al) (3 мм)	w	0,8	30	60	—	600	Исходное состояние	7–50 ($\psi > 20\%$, $\varphi > 80°$),
	HB	267	263	267	—	290	272	
	$\sigma_в$	80	104	100	—	115	115	
	ψ	22	23	23	—	22	30	1–600
	φ	75	88	76	—	60	180	($\psi > 20\%$, $\varphi > 60°$)
ВТ5 (5% Al) (поковка)	w	1	20	80	—	600	Исходное состояние	1–200 ($\psi > 20\%$, $\varphi > 60°$)
	HB	213	266	272	—	252	280	
	$\sigma_в$	109	106	107	—	112	105	
	ψ	25	21	23	—	15	22	
	φ	60	60	70	—	50	70	
ОТ4-1 (1,59% Al–1,07% Mn) (3,5 мм)	w	—	12	40	200	600	Исходное состояние	18–100 ($\psi > 23\%$, $\varphi > 70°$),
	HB	—	192	230	250	301	225	
	$\sigma_в$	—	80	80	95	109	87	
	ψ	—	20	27	24	20	44	12–150
	φ	—	66	90	54	40	180	($\psi > 20\%$, $\varphi > 60°$)
ОТ4 (А) (2,8% Al–1,2% Mn) (5 мм)	w	2,5	35	—	160	600	Исходное состояние	25–400
	HB	205	215	—	230	280	245	($\psi > 30\%$,
	$\sigma_в$	83	90	—	95	110	105	$\varphi > 80°$)
	ψ	30	34	—	44	29	26	
	φ	80	130	—	125	60	115	
ОТ4 (Б) (3% Al–1,8% Mn) (3 мм)	w	1,2	5	30	200	600	Исходное состояние	9–60 ($\psi > 23\%$, $\varphi > 70°$),
	HB	210	212	230	242	310	222	
	$\sigma_в$	98	101	110	112	137	110	5–200
	ψ	17	22	25	30	16	34	($\psi > 20\%$,
	φ	66	68	82	60	30	180	$\varphi > 60°$)
	$a_н$	9	7,5	7,8	8,0	3,5	7	

Продолжение табл. 2

Марка сплава и толщина листов	Механические свойства околошовной зоны при 20 °С (средние по данным испытаний пяти образцов) в зависимости от скорости охлаждения w в интервале 1000—800° С							$A_{н\,опт}^{*}$ в *кгм/см²*
ОТ4 (В) (3% Al — 2% Mn) (3 мм)	w	1	30	—	100	600	Исходное состояние	7—70 ($\psi \geq 2$%, $\varphi \geq 80°$), 1—200 ($\psi \geq 20$%, $\varphi \geq 60°$)
	HB	225	230	—	262	388	250	
	$\sigma_в$	95	99	—	103	130	112	
	ψ	28	27	—	21	16	21	
	φ	60	90	—	71	42	130	
ОТ4-2 (7,5% Al — 1,5% Mn) (3 мм)	w	2	12	20	160	600	Исходное состояние	15—60 (пластические свойства низкие $\psi = 18 — 19$%, $\varphi = 30 \div 33$)
	HB	290	300	300	310	380	300	
	$\sigma_в$	109	117	119	123	143	130	
	ψ	28	18	19	19	9	21	
	φ	26	47	33	27	11	22	
	$a_н$	5,8	4	3,7	4,5	1,6	3,3	
ПРМ-2 (3 мм)	w	1	6	30	150	600	Исходное состояние	20—120 ($\psi \geq 30$%, $\varphi \geq 80°$), 12—3,0 ($\psi \geq 28$%, $\varphi \geq 60°$)
	HB	248	225	225	237	242	265	
	$\sigma_в$	90	90	100	100	112	106	
	ψ	14	22	40	30	30	38	
	φ	28	37	92	78	50	180	
	$a_н$	4	7	10,5	9	8	8	
АТ3Н (2,68% Al — 0,87% Cr, Fe, Si, B) (3 мм)	w	1	—	40	95	600	Исходное состояние	5—60 ($\psi > 23$%), 10—300 ($\psi > 20$%)
	HB	215	—	225	225	250	260	
	$\sigma_в$	88	—	85	85	98	100	
	ψ	11	—	25	22	19	33	
АТ3С (3,02% Al — 1,59% Cr, Fe, Si, B) (3 мм)	w	1,5	—	40	150	600	Исходное состояние	8—150 ($\psi > 27$%, $\varphi > 120°$), 1,5—350 ($\psi > 2$%, $\varphi > 80°$)
	HB	240	—	270	340	380	288	
	$\sigma_в$	102	—	105	110	132	115	
	ψ	25	—	29	27	19	40	
	φ	85	—	150	120	25	160	
АТ3В (3,4% Al — 2,28% Cr, Fe, Si, B) (3 мм)	w	1	—	40	95	600	Исходное состояние	2—100 ($\psi > 23$%, $\varphi > 60°$)
	HB	310	—	315	330	425	335	
	$\sigma_в$	115	—	120	117	155	130	
	ψ	22	—	26	20	12	17	
	φ	70	—	65	65	20	80	
АТ4Н (4,05% Al — 0,63% Cr, Fe, Si, B) (3 мм)	w	2	—	50	100	600	Исходное состояние	2—300 ($\psi > 23$%, $\varphi > 80°$)
	HB	225	—	225	245	300	250	
	$\sigma_в$	100	—	100	100	114	110	
	ψ	23	—	32	29	28	26	
	φ	85	—	90	95	75	180	

Продолжение табл. 2

Марка сплава и толщина листов	Механические свойства околошовной зоны при 20° С (средние по данным испытаний пяти образцов) в зависимости от скорости охлаждения в интервале 1000—800° С							$A_{кп}^{в}$ в кгм/см²
ВТ4С (4,32% Al—1,28% Cr, Fe, Si, B) (3 мм)	w	1	—	30	100	600	Исходное состояние	5—120 ($\psi \geqslant 23\%$, $\varphi \geqslant 50°$)
	HB	295	—	290	310	300	320	
	$\sigma_в$	125	—	125	125	130	130	
	ψ	26	—	23	28	16	18	
	φ	80	—	90	80	25	60	
ВТ4В (5,22% Al — 2,74% Cr, Fe, Si, B) (3 мм)	w	2	—	60	100	600	Исходное состояние	20—75 ($\psi \geqslant 2\%$, $\varphi \geqslant 5°$)
	HB	320	—	328	344	470	340	
	$\sigma_в$	125	—	114	130	167	135	
	ψ	9	—	26	18	0	10	
	φ	50	—	50	55	3	10	
ВТ8Н (7,00% Al— 0,73% Cr, Fe, Si, B) (3 мм)	w	1	—	35	80	600	Исходное состояние	1—600 (пластические свойства низкие $\psi = 15—17\%$, $\varphi = 50—55°$)
	HB	280	—	290	300	365	350	
	$\sigma_в$	105	—	110	112	114	120	
	ψ	15	—	16	17	16	25	
	φ	50	—	50	50	55	170	
ВТ6С (4,56% Al— 3,36% V) (16 мм)	w	1,3	13	30	150	600	Исходное состояние	6—1,60 ($\psi \geqslant 2\%$, $\varphi \geqslant 30°$)
	HB	315	300	322	350	370	320	
	$\sigma_в$	102	100	110	110	115	112	
	ψ	23	28	28	30	23	23	
	φ	20	33	32	30	26	30	
ВТ6 (6% Al—4% V) (3 мм)	w	2	—	30	110	600	Исходное состояние	2—40 ($\psi \geqslant 20\%$)
	HB	300	—	300	320	355	285	
	$\sigma_в$	112	—	112	120	123	113	
	ψ	22	—	22	15	18	26	
ВТ14 (Б) (4,05% Al— 2,8% Mo — 0,88% V) (3 мм)	w	3	15	22	70	600	Исходное состояние	3—12 ($\psi \geqslant 5\%$, $\varphi \geqslant 30°$)
	HB	285	305	340	340	390	280	
	$\sigma_в$	117	126	128	143	150	117	
	ψ	24	18	16	6	6	10	
	φ	42	29	22	14	8	36	
ВТ14 (4,5% Al— 3,5% Mo) (3 мм)	w	1,4	15	27	150	600	Исходное состояние	1—8 ($\psi \geqslant 13\%$, $\varphi \geqslant 36°$), 400—600 ($\psi \geqslant 10\%$, $\varphi \geqslant 36°$)
	HB	290	315	350	360	340	310	
	$\sigma_в$	115	120	125	137	130	110	
	ψ	18	12	11	7	10	23	
	φ	35	27	23	18	36	19	

Продолжение табл. 2

Марка сплава и толщина листов	Механические свойства околошовной зоны при −0 °С (среднее по данным испытаний пяти образцов) в зависимости от скорости охлаждения w в интервале 1000–800 °С							$\Delta w^{*}_{опт}$ в *град/сек*
ВТ14 (Al (4,4% Al — 3,23% Mo — 1,16% V) (3 мм)	w	1	9	22	150	600	Исходное состояние	2–15 ($\psi > 20\%$, $\varphi > 30°$), 300–600 ($\psi \geqslant 15\%$, $\varphi > 30°$)
	НВ	285	270	330	370	332	310	
	$\sigma_в$	121	122	128	142	127	140	
	ψ	20	21	8	6	18	44	
	φ	24	38	28	10	44	47	
	$a_н$	5	7	4,5	3	7	7	
ВТ16 (2,62% Al — 7,5% Mo) (3 мм)	w	2	15	40	180	600	Исходное состояние	60–600 ($\psi < 30\%$, $\varphi > 90°$)
	НВ	310	310	300	250	230	230	
	$\sigma_в$	134	133	132	126	113	112	
	ψ	18	11	23	45	63	52	
	φ	33	42	43	180	180	180	
ВТ15 (6,8% Al — 7,0% Mo — 11% Cr) (2,8 мм)	w	1,3	10	20	150	600	Исходное состояние	6–600 ($\psi > 30\%$), 1–600 ($\psi > 20\%$)
	НВ	330	300	305	305	300	310	
	$\sigma_в$	115	115	122	120	118	118	
	ψ	21	35	33	36	40	33	

* В скобках указано, по каким свойствам выбран $\Delta w_{опт}$.

Примечания. 1. Параметры термических циклов на ветви нагрева, принятые по методике ИМЕТ-1: скорость нагрева $w_н = 250 - 350$ *град/сек*, максимальная температура нагрева $t_{max} = 1300$ °С.

2. При испытании на изгиб радиус оправки был равен толщине образцов ИМЕТ-1, т. е. соответственно 2 или 3 мм.

МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ, НЕ ИМЕЮЩИЕ ПОЛИМОРФНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

К группе материалов без полиморфизма следует отнести аустенитные сплавы на железохромоникелевой или никельхромистой основах, сохраняющие при комнатной температуре структуру γ-твердого раствора, сплавы тугоплавких металлов, алюминиевые сплавы, β-сплавы титана и т. д.

При выборе технологии и режимов сварки таких сплавов необходимо: предупредить высокотемпературное межкристаллитное разрушение сварных швов (горячие трещины), обеспечить заданный уровень прочности и пластичности металла шва и зоны термического влияния при отрицательных, комнатной или повышенных температурах, а также заданные характеристики длительной прочности, ползучести и коррозионной стойкости в условиях эксплуатации. Как правило, все эти материалы стремятся сваривать на жестких режимах.

Одним из наиболее надежных средств предотвращения образования горячих трещин при сварке является повышение качества свариваемого металла — ограничение содержания кремния, бора, фосфора, серы и других примесей в аустенитных сталях и никелевых сплавах [3, 4, 5, 9, 10] и примесей внедрения в сплавах тугоплавких металлов. При сварке последних, так же как и при сварке сплавов титана и циркония, предусматриваются эффективные меры защиты металла сварных соединений от насыщения примесями: струйная защита

инертными газами, сварка в камерах с контролируемой атмосферой, электронно лучевая сварка [13].

Важен также выбор соответствующего присадочного материала. При сварке аустенитных сплавов стремятся получить наплавленный металл, имеющий в своем составе вторую фазу в виде мелкодисперсных включений феррита, карбидов ниобия, термодинамически устойчивых нитридов типа TiN, тугоплавких оксидов. Легирование сварных швов аустенитных сталей и никелевых сплавов большими количествами молибдена, вольфрама, тантала, способных подавить процесс высокотемпературного разрушения, эффективно только при условии жесткого ограничения содержания в сварочной ванне кремния, фосфора, серы, легкоплавких примесей и газов [5, 10]. Положительные результаты дает рафинирование металла сварочной ванны или модифицирование структуры шва с помощью галлоидных или высокоосновных флюсов-шлаков [9,12].

Для повышения коррозионной стойкости аустенитных сталей в них и в их сварные швы вводят стабилизирующие легирующие элементы — титан, тантал, ниобий и др., а также ограничивают содержание углерода.

Присадочные материалы для сварки сплавов алюминия должны содержать легирующие элементы, уменьшающие интервал кристаллизации и повышающие температуру солидуса сплавов. Это достигается путем регулирования количества и распределения легкоплавкой эвтектики и введения в металл шва элементов, образующих с компонентами эвтектики более тугоплавкие перетектики [2].

Окончательно выбирают и корректируют состав присадочного материала по результатам технологических сварочных проб на горячие трещины, а также по данным коррозионных и механических испытаний сварных соединений.

При выборе режимов сварки сплавов данной группы руководящими являются два условия: 1) предупреждение высокотемпературного межкристаллитного разрушения сварных соединений; 2) получение минимальной зоны разупрочнения (для термически упрочняемых алюминиевых сплавов, для деформированных аустенитных сталей, алюминиевых и других сплавов) или минимальной зоны повышенной хрупкости в месте сварки (для сплавов молибдена, вольфрама, хрома).

Влияние режимов сварки на образование горячих трещин неоднозначно. Уменьшение величины погонной энергии, а также увеличение скорости охлаждения металла шва способствуют подавлению зональной ликвации, измельчению зерна, уменьшению величины внутренних деформаций и в этом смысле благоприятно сказываются на технологической прочности соединений. Однако те же причины могут вызвать образование менее благоприятно ориентированной структуры шва и увеличение темпа нарастания внутренних деформаций. Соотношение этих факторов при выбранном режиме сварки определяет сопротивляемость сварных соединений образованию горячих трещин и соответственно оптимальный интервал режимов (по $\Lambda w_{опт}$) для соединений данного уровня жесткости. Все это в равной степени относится и к такому технологическому приему, как предварительный и сопутствующий подогрев изделий при сварке.

Режимы сварки не оказывают резкого влияния на механические свойства аустенитных сталей, однако увеличение размеров сварочной ванны нежелательно, так как приводит к снижению коррозионной стойкости соединений в связи с появлением четко выраженной ликвационной зоны и выпадением карбидов (преимущественно карбидов хрома) и некоторых других фаз из твердого раствора.

При сварке нагартованных сплавов ниобия и тантала и термически необрабатываемых сплавов алюминия (АМ1, АМг3, АМг5, АМг6, АМц и др.) в зоне термического влияния наблюдается некоторое разупрочнение, связанное с рекристаллизацией обработки. При сварке сплавов в отожженном состоянии сварные соединения равнопрочны основному металлу. Для повышения пластичности сварных соединений сплавов ниобия, склонных к старению, проводят отжиг после сварки для перестаривания. Сплавы, не склонные к старению, не требуют термической обработки.

Сплавам вольфрама, хрома и молибдена свойственно резкое охрупчивание при сварке вследствие образования в зоне сварочного нагрева литой и рекристаллизованной структуры. Для уменьшения размеров зоны хрупкости и ограничения роста зерна в этой зоне сварку сплавов рекомендуют выполнять при минимально возможной погонной энергии и в импульсных режимах с использованием различных теплоотводящих устройств. По характеристикам кратковременной и длительной прочности сварные соединения сплавов вольфрама, хрома и молибдена не отличаются от основного металла в рекристаллизованном состоянии.

Важную технологическую проблему представляет собой сварка высокопрочных стареющих сплавов на основе алюминия (АВ, АВ5, АК6, АК6-1, Д-20, В95 и др). При выборе режимов сварки сплавов стремятся ограничить перегрев жидкого металла, сократить время пребывания сварочной ванны в жидком состоянии, возможно уменьшить длительность пребывания металла зоны термического влияния при высоких температурах. При этом повышается сопротивляемость шва и околошовной зоны хрупкому разрушению и уменьшается степень разупрочнения основного металла вблизи шва. Такие условия обеспечивают источники тепла большой интенсивности, позволяющие вести сварку с повышенной скоростью. Жесткие режимы сварки способствуют также и уменьшению пористости. После сварки проводят полную термическую обработку сварных конструкций: закалку + искусственное старение для сплавов типа АВ, отжиг перед сваркой, закалку — искусственное старение для сплава Д20, закалку и естественное старение для сплавов Д1 и Д16, длительный гомогенизирующий отжиг и естественное старение для сплава В95 [2]

ЛИТЕРАТУРА

1 Балковец Д. С. Сварка тугоплавких металлов. Справочник «Конструкционные материалы» Т. 3. М., «Советская энциклопедия», 1963.

2 Верченко В. Р., Пугачев А. И. Сварка алюминиевых сплавов. Справочник «Конструкционные материалы» Т. 3. М. «Советская энциклопедия», 1963.

3 Любавский К. В. Металлургия сварки стали плавлением. Справочник по сварке. Т. 1. Машгиз, 1961.

4 Медовар Б. И. Сварка хромоникелевых аустенитных сталей. Машгиз, 1958.

5 Мовчан Б. А. Микронеоднородность в литых сплавах. ГИТ. I УССР, 1962.

6. Рыкалин Н. Н. Свариваемость металлов. Сб. «Проблемные вопросы сварки». Труды Всесоюзного совещания по сварке НТО Машпром. 1952.

7. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. «Справочник по сварке» Т. 1, гл. II. Машгиз, 1961.

8 Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. Машгиз. 1951.

9 Соколов Ю. В., Шоршоров М. Х. Влияние состава галоидных флюсов на свойства сварных швов хромоникелевых сплавов. «Сварочное производство», 1963, № 3.

10 Шоршоров М. Х. Кристаллизация сварочной ванны и процессы в околошовной зоне. «Справочник по сварке» Т. 1, гл. IV. Машгиз, 1961.

11 Шоршоров М. Х. Металловедение сварки стали и сплавов титана. «Наука», 1965.

12 Шоршоров М. Х. Сварка никелевых сплавов. Справочник «Конструкционные материалы». Т. 3. «Советская энциклопедия», 1963.

13 Шоршоров М. Х., Назаров Г. В. Сварка титановых сплавов. Справочник «Конструкционные материалы». Т. 3. «Советская энциклопедия», 1963.

ГЛАВА III

СВАРКА НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СВАРИВАЕМОСТИ

Низкоуглеродистые стали обладают хорошей свариваемостью. Однако технология сварки их должна предусматривать и обеспечивать определенный комплекс требований, основным из которых является достижение равнопрочности сварного соединения с основным металлом и отсутствие дефектов в сварном соединении. Для этого механические свойства металла шва, околошовной зоны и сварного соединения в целом должны быть не ниже нижнего предела свойств основного металла. В ряде случаев, исходя из конкретных условий работы конструкции, допускается снижение отдельных показателей механических свойств сварного соединения по сравнению с показателями свойств основного металла. Однако в металле швов не должно быть таких дефектов, как трещины, непровары, поры, подрезы. Швы должны иметь требуемые по чертежу размеры и форму. Сварное соединение должно быть стойким против перехода в хрупкое состояние. В отдельных случаях к сварным соединениям предъявляются дополнительные требования (работоспособность в условиях вибрационных и ударных нагрузок, повышенных или пониженных температур и т. д.). Однако во всех случаях технология должна обеспечивать максимальную производительность и экономичность процесса сварки при безусловной надежности и долговечности конструкции.

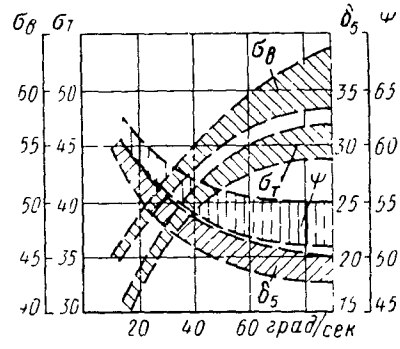
Механические свойства металла шва и сварного соединения зависят от его структуры, которая определяется химическим составом, режимом сварки и термообработки. Химический состав металла шва зависит от доли участия основного и электродного металлов в образовании металла шва и взаимодействия между металлом и шлаком и газовой фазой. При сварке низкоуглеродистой стали металл шва незначительно отличается по составу от основного металла. Это отличие в основном сводится к снижению содержания в металле шва углерода, так как металл электродного стержня или электродной проволоки содержит меньше углерода, чем основной металл, и повышению содержания марганца и кремния (табл. 1). Снижение прочности металла шва, вызванное уменьшением содержания в нем углерода, при дуговых способах сварки полностью компенсируется за счет увеличения скорости его остывания и легирования металла через проволоку, покрытие или флюс марганцем и кремнием. Обеспечение равнопрочности металла шва при дуговой сварке малоуглеродистой стали не вызывает затруднений. При электрошлаковой сварке для обеспечения равнопрочности металла шва с основным металлом обычно применяют низколегированную проволоку марки Св-10Г2.

Значительное влияние на механические свойства металла шва оказывает скорость охлаждения последнего (см. рисунок), что объясняется изменением количества и строения перлитной фазы. Увеличение скорости охлаждения приводит к возрастанию прочностных и к снижению пластических свойств металла шва. Ударная вязкость металла шва уменьшается с ростом скорости охлаждения. Однако критическая температура перехода металла однослойного шва в хрупкое состояние практически не зависит от скорости охлаждения.

1 Средний химический состав металла швов, сваренных на стали МСт. 3 малоуглеродистой электродной проволокой

Металл	Род стали	Содержание в %				
		C	Si	Mn	S	P
Сталь МСт 3 (ГОСТ 380—60)	Кипящая	0,14—0,22	Следы	0,40—0,65	До 0,055	До 0,050
	Спокойная	0,14—0,22	0,12—0,30	0,45—0,65	» 0,055	» 0,050
Шва при сварке покрытыми электродами	—	0,08—0,13	0,20—0,25	0,30—0,90	» 0,030	0,011—0,031
То же при сварке под флюсом	—	0,12—0,18	0,15—0,40	0,65—0,75	0,016—0,045	0,012—0,050
То же при электрошлаковой сварке	—	0,10—0,16	0,07—0,16	0,45—0,60	0,017—0,04	0,013—0,041

Скорость охлаждения металла шва определяется толщиной свариваемого металла, режимом сварки и начальной температурой изделия. Изменение механических свойств металла шва связано не только со скоростью охлаждения, но и с пластической деформацией, возникающей в металле под воздействием сварочных напряжений и вызывающей заметное повышение предела текучести. Влияние скорости охлаждения в наибольшей степени проявляется при дуговой сварке однослойных угловых швов и последнего слоя многослойных стыковых и угловых швов на толстом металле при наложении их на холодные, предварительно сваренные швы. Металл многослойного шва, особенно при сварке покрытыми электродами, обладает более низкой критической температурой перехода в хрупкое состояние, чем металл однослойного шва, что связано в основном с измельчением структуры металла шва под воздействием тепла, выделяемого при наложении последующих слоев. Подобное термическое воздействие повторного нагрева сходно с воздействием, оказываемым нормализацией.



Зависимость между скоростью охлаждения и механическими свойствами металла шва

При электрошлаковой сварке стыковых и угловых швов на всех практически применяемых режимах сварки скорость охлаждения невелика. Поэтому изменение режима не оказывает заметного влияния на механические свойства металла шва.

Особенности термического цикла шва при электрошлаковой сварке предопределяют длительное пребывание его при высоких температурах, что приводит к росту зерна, образованию видманштеттовой структуры и к снижению величины ударной вязкости металла шва.

Механические свойства металла околошовной зоны зависят от конкретных условий сварки. При всех видах дуговой сварки изменение их сводится к незначительному упрочнению металла в зоне перегрева, вызванному в некоторых случаях образованием видманштеттовой структуры. При электрошлаковой

сварке в большинстве случаев наблюдается образование видманштеттовой крупнозернистой структуры, что приводит к значительному снижению ударной вязкости металла в этой зоне, не вызывая изменений его прочностных свойств. При сварке сталей, склонных к старению, на участке рекристаллизации околошовной зоны возможно снижение ударной вязкости металла.

Конструкции из низкоуглеродистой стали в некоторых случаях после сварки подвергаются термической обработке: высокий отпуск для снятия сварочных напряжений или нормализация для выравнивания свойств и улучшения структуры отдельных участков сварного соединения. При дуговой сварке угловых однослойных и многослойных швов с перерывом для охлаждения при наложении отдельных слоев все виды термической обработки (кроме закалки) приводят к снижению прочностных и повышению пластических свойств металла шва (табл. 2). Это является следствием того, что при термической обработке дости-

2. Влияние термической обработки на механические свойства металла шва при сварке малоуглеродистой стали

Состояние металла шва	Последний шов многослойного шва (автоматическая сварка под флюсом)					Электрошлаковая сварка				
	$\sigma_т$ в кГ/мм²	$\sigma_в$ в кГ/мм²	δ_5 в %	ψ в %	$a_н$ в кГ м/см²	$\sigma_т$ в кГ/мм²	$\sigma_в$ в кГ/мм²	δ_5 в %	ψ в %	$a_н$ в кГ м/см²
После сварки	31,4	46,3	25,1	62,2	10,1	32,1	46,7	23,3	56,0	8,2
После отпуска при 650° С	25,7	43,3	33,1	69,9	12,5	31,8	46,3	24,1	66,8	7,9
После нормализации	24,0	38,2	35,1	71,2	15,7	30,7	46,4	34,7	73,3	17,9
После отжига	23,0	39,5	35,3	71,5	13,4	—	—	—	—	—
После закалки	34,9	54,4	24,4	—	8,0	—	—	—	—	—

Примечание. Состав металла шва при сварке под флюсом 0,12% C, 0,75% Mn, 0,22% Si, при электрошлаковой сварке 0,14% C, 0,80% Mn, 0,07% Si

гается более медленное остывание металла шва, чем в условиях термического цикла сварки. При сварке однослойных стыковых швов и многослойных стыковых и угловых швов, свариваемых короткими участками без перерыва между наложением отдельных слоев, из-за незначительной разницы в скоростях остывания значение термической обработки сказывается в меньшей степени. При электрошлаковой сварке термическая обработка мало влияет на прочностные и пластические свойства металла шва (табл. 2). Однако нормализация приводит к резкому возрастанию значения ударной вязкости. Объясняется это тем, что при электрошлаковой сварке скорость остывания металла шва в условиях термического цикла сварки сопоставима со скоростями остывания при термической обработке.

Швы, сваренные на низкоуглеродистых сталях всеми способами сварки плавлением, обладают удовлетворительной стойкостью против образования кристаллизационных трещин, что обусловливается низким содержанием в металле шва углерода. Однако при сварке низкоуглеродистой стали, содержащей углерод по верхнему пределу (0,21—0,25%), угловых швов, первого слоя многослойного стыкового шва, односторонних швов с полным проваром кромок и первого слоя стыкового шва с обязательным зазором возможно образование кристаллизационных трещин, что связано в основном с неблагоприятной формой провара (узкая и глубокая форма провара с коэффициентом формы 0,8—1,2). Появление пор, непроваров, подрезов, наплывов и прожогов при сварке низкоуглеродистых

сталей вызывается общими закономерностями самого процесса сварки и не имеет каких-либо характерных особенностей.

Малоуглеродистая сталь сваривается практически всеми видами и способами сварки плавлением.

ГАЗОВАЯ СВАРКА

Газовая сварка низкоуглеродистых сталей не вызывает трудностей, однако для получения качественных соединений необходимо правильно выбирать режим сварки и в первую очередь мощность газового пламени. Мощность ацетилено-кислородного пламени выбирают по расходу ацетилена из расчета 100 *л/ч* на 1 *мм* толщины свариваемого металла при левом способе сварки и 150 *л/ч* — при правом. При сварке металла разной толщины наконечник выбирают по большей толщине свариваемого металла.

Сварка низкоуглеродистой стали, как правило, производится нормальным пламенем в любом пространственном положении шва, левым или правым способами. При сварке правым способом в 1,5 раза уменьшается ширина зоны термического влияния, повышается к. п. д. использования тепла пламени, а следовательно, производительность. Однако это преимущество проявляется лишь при сварке металла толщиной свыше 5 *мм*.

Для сварки низкоуглеродистой стали обычно применяют сварочную проволоку Св-08 и Св-08А (ГОСТ 2246—60 *). Диаметр ее принимают для левого способа сварки равным половине толщины свариваемого металла плюс 1 *мм*, для правого способа — половине толщины металла. При большем диаметре получаются швы низкого качества, так как основной металл плавится раньше, чем присадочная проволока, и дальнейший нагрев, необходимый для расплавления проволоки, может привести к его пережогу. Применение проволоки малого диаметра приводит к ее преждевременному расплавлению и, как следствие, к пережогу наплавленного металла.

Для сварки ответственных конструкций из низкоуглеродистой стали рекомендуется применять низколегированную присадочную проволоку — кремнемарганцовистую марки Св-12ГС и марганцовистую марок Св-08ГА, Св-10ГА (ГОСТ 2246—60*). Эти проволоки обеспечивают высокие механические свойства шва и обладают хорошими технологическими свойствами.

СВАРКА ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

При сварке конструкций из низкоуглеродистых сталей широко используются электроды с рутил-карбонатным покрытием типа Э42-Т марки АНО-5 и типа Э46-Т марки МР-3. Ранее широко распространенные электроды марки ОММ-5 (тип Э46) с рудно-кислым покрытием в настоящее время из-за высокой токсичности имеют ограниченное применение. Для особо ответственных сварных конструкций используют электроды с фтористо-кальциевым и фтористо-кальциево-рутиловым покрытием типа Э42А марок УОНИ-13/45 и СМ-11, обеспечивающие повышенные пластические свойства и стойкость металла шва против кристаллизационных трещин.

Недостаток электродов марки УОНИ-13/45 заключается в том, что сварку можно вести только постоянным током обратной полярности, и, кроме того, при наличии ржавчины на кромках или увлажнении покрытия понижается стойкость против образования в металле шва пор. Электроды марки СМ-11 в отличие от электродов марки УОНИ-13/45 пригодны для сварки не только постоянным, но и переменным током.

При изготовлении строительных и технологических металлоконструкций широко применяются высокопроизводительные электроды для сварки с глубоким проваром марок ЦМ-7С. Механические свойства металла швов, сваренных электродами указанных выше марок, не уступают свойствам основного металла и могут быть даже выше их.

Конструкции под сварку подготавливают в соответствии с ГОСТами 5264—69, 11534—65 и 8713—58*. Режим сварки выбирают в зависимости от толщины свариваемого металла и типа шва (однослойный, многослойный). Зависимость между диаметром электрода и толщиной свариваемого металла приведена в табл. 3.

3. Зависимость между диаметром электрода и толщиной свариваемого металла при ручной сварке покрытыми электродами

Толщина металла в мм	0,5—1,00	1,1—2,00	2,1—3,0	3,1—10,00	10,1—15,00	15,1—20,0	Свыше 20,0
Диаметр электрода в мм	1,0—1,5	1,5—2,5	2,5—4	4,0—5,0	5,0—6,0	5,0—8,0	5,0—10,0

Данные для выбора оптимального значения тока при сварке приведены в табл. 4.

Род и полярность тока принимают исходя из особенностей покрытия. При сварке низкоуглеродистых сталей вручную обеспечиваются достаточно высокие пластические свойства металла околошовной зоны на всех режимах сварки и поэтому в большинстве случаев не требуются специальные меры, направленные на предотвращение образования на этом участке закалочных структур

4. Рекомендуемые токи при сварке электродами различных марок

Марка электрода	Диаметр электрода в мм	Ток в а при положении шва в пространстве		
		нижнем	вертикальном	потолочном
АНО-5	4	160—230	120—160	130—180
	5	190—300	130—170	—
	6	270—380	—	—
УОНИ-13	3	80—110	70—100	70—100
	4	120—180	100—130	100—130
	5	160—190	140—170	—
	6	190—230	—	—
ОЗС-2	3	80—100	60—80	60—80
	4	130—150	120—140	120—140
	5	150—170	130—150	—
МР-3	4	160—200	140—180	140—180
	5	180—240	160—200	—
	6	260—320	—	—

Однако при сварке угловых швов на толстом металле и первого слоя многослойного шва для повышения стойкости металла шва против кристаллизационных трещин рекомендуется предварительный подогрев свариваемых деталей до 120—150° С. Необходимо учитывать, что при исправлении дефектных участков швов малого сечения (беглым швом) вследствие значительной скорости остывания металл подварки обладает пониженными пластическими свойствами. Поэтому подварку дефектных участков следует производить швами нормального сечения длиной не менее 100 мм или для уменьшения скорости охлаждения подогревать (любым способом) исправляемый участок примерно до 150° С

Наличие непереваренных прихваток и мест с подваркой беглым швом резко снижает пластичность металла на этом участке и может привести к понижению эксплуатационной надежности конструкции

СВАРКА ПОД ФЛЮСОМ

Равнопрочные соединения при автоматической и полуавтоматической сварке малоуглеродистой стали под флюсом получают в основном за счет подбора соответствующих сочетаний флюсов и электродных проволок (марганцовистых высококремнистых флюсов марки АН-348-А или ОСЦ-45 и низкоуглеродистой электродной проволоки марок Св-08 и Св-08А). При этом достигается высокая стойкость металла шва против образования пор и кристаллизационных трещин. При сварке особо ответственных сварных конструкций, а также ржавого металла рекомендуется использовать электродную проволоку Св-08ГА.

Автоматическая сварка низкоуглеродистой стали обычно выполняется электродной проволокой диаметром 4 и 5 *мм*. Тонкий металл и кольцевые швы обечаек диаметром 1000 *мм* и менее сваривают проволокой диаметром 0,8—3 *мм*. Полуавтоматическая сварка производится электродной проволокой диаметром 1,2—2 *мм*.

В конструкциях из низкоуглеродистой стали наряду со сваркой с разделкой кромок широко применяется сварка стыковых швов и без разделки кромок. Увеличение доли основного металла в металле шва, характерное для этого случая, не является препятствием для его применения, так как содержание углерода в основном металле невелико.

Режим сварки стыковых соединений зависит от типа шва (односторонний, двусторонний, однослойные, многослойные), способа подготовки кромок (без разделки, с разделкой, с обязательным зазором) и от способа удержания сварочной ванны (на флюсовой подушке, на стальной остающейся или медной подкладке, с ручной подваркой). Данные о режимах автоматической сварки стыковых швов без разделки кромок с обязательным зазором на флюсовой подушке приведены в табл. 5. При сварке двусторонних швов на флюсомедной или стальной

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

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

6. Режимы автоматической сварки под флюсом многослойных стыковых швов

Толщина металла в мм	Подготовка кромок	Слои	Диаметр электродной проволоки в мм	Ток в а	Род тока и полярность	Напряжение в в	Примечания
Более 16	V-образная	1-и	4	750—800	Постоянный обратной полярности	30—35	Первые два слоя сваривают на флюсовой подушке
			5		Переменный	35—40	
		2-и и последующие	4	800—900	Постоянный обратной полярности	30—35	
			5		Переменный	35—40	
Более 22	X-образная	1-и	4	750—800	Постоянный обратной полярности	30—35	Вылет электрода 40—50 мм
			5		Переменный	35—40	
		2-и 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.

7. Режимы полуавтоматической сварки под флюсом двусторонних стыковых швов

Толщина металла в мм	Диаметр электродной проволоки в мм	Постоянный ток обратной полярности				Переменный ток				Примечание
		Ток в а	Напряжение дуги в в	Скорость подачи электродной проволоки в м/ч	Скорость сварки в м/ч	Ток в а	Напряжение дуги в в	Скорость подачи электродной проволоки в м/ч	Скорость сварки в м/ч	
3	1.6	180—190	24—26	100—105	30—35	—	—	—	—	Сварку производить на флюсовой подушке
	2.0	190—200	26—28	80—85	30—35	—	—	—	—	
5	1.6	240—260	28—30	170—175	25—30	250—275	30—32	170—175	20—25	
	2.0	260—280	28—30	140—145	25—30	275—300	32—34	140—145	20—25	
8	2.0	420—440	32—34	280—290	25—30	425—450	34—36	280—290	20—30	При зазоре не более 10 мм сварку можно производить на весу
12	2.0	420—440	32—34	280—290	15—20	425—450	34—36	280—290	15—20	
16	2.0	420—440	34—36	280—290	12—16	425—450	36—38	280—290	12—16	Разделка кромок обеих сторон на глубину 4 мм

8. Механические свойства металла стыкового шва из стали МСт. 3, сваренного под флюсом АН-348-А (без термообработки) проволокой Св-08

Металл	σ_t в кГ/мм²	$\sigma_в$ в кГ/мм	δ_5 в %	$a_н$ в кГм/см²
Основной	Не менее 24	38–47	Не менее 25	Не менее 8
Шва	30–35	44–50	25–30	8–14

9. Режимы автоматической и полуавтоматической сварки под флюсом стыковых швов на тонколистовой стали (постоянный ток обратной полярности)

Толщина металла в мм	Тип шва	Техника сварки	Зазор между кромками в мм	Диаметр электродной проволоки в мм	Ток в а	Напряжение дуги в в	Скорость сварки в м/ч
1	Односторонний	На медной подкладке	0–0,2	1,0	80–90	24–26	48–50
		На весу	0–0,2	1,2	110–120	24–26	48–50
	»	На флюсомедной подкладке	0,5–0,6	1,6	130–140	28–30	30–32
2	»	На флюсовой подушке и на магнитном стенде	0–1,2	2,0	190–200	30–32	58–60
3	Двусторонний основной подварочный	На весу	0–0,8	2,0	160–180	30–32	78–80
			—	2,0	170–180	30–32	78–80

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

Катет шва в мм	Диаметр электродной проволоки в мм	Ток в а	Напряжение дуги в в		Скорость сварки в м/ч
			Переменный ток	Постоянный ток обратной полярности	
6	2	350–400	32–34	30–32	26–28
	3	400–450	34–36	30–32	45–47
	4	550–600	34–38	30–34	52–54
8	2	400–450	32–34	32–34	22–24
	3	550–600	34–36	32–34	28–30
	4	550–650	34–38	32–34	30–32
10	2	400–450	34–36	32–34	12–14
	3	600–650	34–36	32–34	20–22
	5	700–800	34–38	32–36	23–25
12	2	400–450	34–36	32–34	8–10
	4	600–650	34–38	32–36	18–20
	5	750–850	34–38	32–36	18–20

подкладке режим сварки будет таким же, а при сварке односторонних швов ток следует несколько увеличивать. Режимы автоматической сварки многослойных стыковых швов приведены в табл. 6, а стыковых швов полуавтоматом — в табл. 7.

Из данных табл. 8 видно, что металл стыкового шва, выполненного под флюсом, обладает прочностью и пластичностью, равной или превышающей свойства основного металла.

Сварка стыковых швов на листовом металле толщиной до 3 *мм* производится электродной проволокой диаметром 0,8—2,0 *мм*, что в сочетании с постоянным током позволяет снизить мощность дуги при обеспечении ее стабильности и ввиду уменьшения глубины провара дает возможность под флюсом сваривать стыковые швы на тонколистовой стали. Режимы автоматической и полуавтоматической сварки приведены в табл. 9.

Сварка под флюсом угловых швов осуществляется наклонным электродом или при положении «в лодочку». Режимы сварки этих швов приведены в табл. 10 и 11.

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

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

Для предупреждения образования кристаллизационных трещин угловые швы с разделкой кромок рекомендуется сваривать в два слоя. При этом слой должен выполняться на режиме, обеспечивающем минимальный провар основного металла. В зависимости от условий сварки и охлаждения, определяемого режимом сварки, а также от толщины основного металла механические свойства металла углового шва изменяются в широких пределах. Для получения металла шва, пластические и прочностные свойства которого должны быть близкими к свойствам основного металла, сечение углового шва (или слоя при многослойной сварке) должно назначаться в зависимости от толщины свариваемого металла. Ориентировочные данные о размерах шва в этом случае следующие:

Толщина более толстого листа в *мм*	8—10	10—22	24—60
Сечение части металла шва или слоя, образованного за счет электродного металла, в *мм*²	25	35	50

СВАРКА В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

При сварке низкоуглеродистых сталей для защиты металла шва широко используется углекислый газ. Аргон и гелий для этих целей применяют ограниченно. Сварка в углекислом газе выполняется плавящимися и в некоторых слу-

ваях неплавящимся электродами. Сварку неплавящимся электродом экономически целесообразно применять при изготовлении конструкций из стали толщиной 0,3—2,0 *мм*. Ее выполняют угольными или графитовым электродами на постоянном токе прямой полярности (обратная полярность недопустима вследствие науглероживания металла шва). Более удобны при сварке неплавящимся электродом соединения с бортовкой кромок. При сварке стыковых соединений вдоль стыка укладывают присадочную проволоку. Режим сварки угольным электродом приведен в табл. 12.

12. Режимы сварки угольным электродом в углекислом газе бортовых соединений

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

Примечание. Расход углекислого газа 8—10 *л/мин*.

Содержание марганца и кремния в металле шва обычно невелико. В результате прочность соединения обычно составляет 50—70% прочности основного металла. Однако в ряде конструкций такие свойства сварного соединения являются приемлемыми.

Автоматическая и полуавтоматическая сварка плавящимся электродом в углекислом газе металла толщиной 0,8—0,3 *мм* и угловым швом с катетами 1,0—4,0 *мм* при любом пространственном положении шва выполняются электродной проволокой диаметром 0,5—1,2 *мм*. Проволоку диаметром 1,3—3,0 *мм* применяют для сварки металла средних толщин и заварки дефектов литья. Сварка в основном ведется в нижнем положении.

Необходимые механические свойства металла шва и высокая стойкость его против кристаллизационных трещин и пор при сварке кипящей и спокойной низкоуглеродистых сталей в углекислом газе достигаются применением электродных проволок марок Св-08ГС или Св-08Г2С (ГОСТ 2246—60 *), легированных кремнием и марганцем. При сварке спокойной низкоуглеродистой стали применяют также электродную проволоку марки Св-12ГС (ГОСТ 2246—60*).

При сварке низкоуглеродистых сталей с содержанием углерода, приближающимся к верхнему пределу (0,21—0,25%), для предупреждения образования в швах кристаллизационных трещин следует применять электродную проволоку марки Св-08ГС или Св-08Г2С. На свойства металла шва значительное влияние оказывает качество углекислого газа. При повышенном содержании в нем азота и водорода могут образоваться поры даже при хорошей защите дуги от воздуха и надлежащем количестве кремния и марганца в сварочной ванне. При применении углекислого газа первого сорта по ГОСТу 8050—64 и электродной проволоки указанных выше марок швы, как правило, получаются плотные без пор.

При сварке в среде углекислого газа отрицательное влияние ржавчины проявляется меньше, чем при сварке под флюсом.

Устойчивое горение дуги при сварке плавящимся электродом в углекислом газе достигается при плотности тока свыше 100 *а/мм*^{2}.

Некоторые данные о рекомендуемых значениях тока, напряжения дуги и вылета электрода при сварке электродной проволокой диаметром 0,5—2,5 *мм* приведены в табл. 13.

Увеличение напряжения дуги приводит к снижению механических свойств металла шва и резкому возрастанию разбрызгивания и нарушению стабильности

процесса, особенно при сварке горизонтальных швов, которые рекомендуется выполнять с использованием электродной проволоки диаметром до 1,2 *мм*

13 Рекомендуемые значения тока, напряжения дуги и вылета электрода при сварке в углекислом газе

Диаметр электродной проволоки в мм	0,5	0,8	1,0	1,2	1,6	2,0	2,5
Ток в *а*	30–100	60–140	80–180	90–220	120–350	200–500	250–600
Напряжение дуги в *в*	18–20	18–22	18–24	18–28	18–32	22–34	24–38
Вылет электрода в *мм*	6–10	8–12	8–14	10–16	14–20	15–25	16–35

Ориентировочные режимы сварки в углекислом газе плавящимся электродом приведены в табл. 14 и 15. При сварке в положениях, отличных от нижнего,

14 Режимы полуавтоматической и автоматической сварки стыковых швов в углекислом газе

Толщина металла в мм	Зазор в мм	Число слоев	Диаметр электродной проволоки в мм	Ток в *а*	Напряжение дуги в *в*	Скорость сварки одного слоя в *м/ч*	Расход газа на один слой в *л/мин*
0,5–1,0	0,5–0,8	1	0,5–0,8	50–60	18–20	20–25	6–7
1,2–2,0	0,8–1,0	1–2	0,8–1,0	70–100	18–20	18–24	10–12
3–5	1,0–2,0	1–2	1,0–2,0	180–200	28–30	20–22	14–16
6–8	1,8–2,2	1–2	2,0	250–300	28–30	18–22	16–18
8–12	1,8–2,2	2–3	2,0	250–300	28–30	16–20	18–20

15 Режимы автоматической и полуавтоматической сварки угловых швов в углекислом газе

Толщина металла в мм	Диаметр электродной проволоки в мм	Катет шва в *мм*	Число слоев	Ток в *а*	Напряжение дуги в *в*	Скорость сварки одного слоя в *м/ч*	Вылет в *мм*	Расход газа на один слой в *л/мин*
1,0–1,5	0,5	1,0–1,2	1	50–60	18–20	18–20	8–10	5–6
1,0–1,5	0,6	1,2–2,0	1	60–70	18–20	18–20	8–10	5–6
1,5–2,0	0,8	1,2–2,0	1	60–70	18–20	16–18	8–10	6–8
1,5–2,0	0,8	1,5–3,0	1	70–110	18–20	16–18	8–10	6–8
1,5–3,0	1,2	2,0–3,0	1	90–130	20–22	14–16	10–12	8–10
3,0–4,0	1,2	3,0–4,0	1	120–150	20–22	16–18	10–12	8–10
3,0–4,0	1,6	3,0–4,0	1	150–180	28–30	20–22	16–18	12–14
5,0–6,0	1,6	5,0–6,0	1	240–260	28–30	26–28	16–18	16–18
5,0–6,0	2,0	5,0–6,0	1	240–300	28–30	29–31	20–24	16–18
Не менее катета шва	2,0	7,0–9,0	1	300–350	30–32	20–22	20–24	18–20
	2,0	9,0–11,0	2	300–350	30–32	24–26	20–24	18–20
	2,0	11,0–13,0	3	300–350	30–32	24–26	20–24	18–20
	2,0	13,0–15,0	4	300–350	30–32	24–26	20–24	18–20

значения тока и напряжения дуги принимают по нижнему пределу. В качестве источников сварочного тока при сварке в углекислом газе плавящимся электродом используют преобразователи и выпрямители с жесткими внешними вольтамперными характеристиками.

Полуавтоматическую сварку стыковых и угловых швов обычно выполняют с поперечными колебаниями конца электрода, амплитуда которых зависит от

ширины и формы разделки и толщины металла. Для предупреждения прожогов при повышенных зазорах между кромками сварку тонкого металла рекомендуется выполнять на спуск при наклоне изделия на 10—20°. Как видно из данных, приведенных в табл. 16, механические свойства металла шва при сварке низкоуглеродистой стали в углекислом газе вполне удовлетворительны.

16. Механические свойства металла швов, сваренных на низкоуглеродистых сталях в углекислом газе (не менее)

Марка электродной проволоки	σ_t, в кГ/мм²	$\sigma_в$, в кГ/мм²	δ, в %	ψ, в %	$a_к$, в кГм/см² при температуре в °С		$a_к$ после механического старения в кГм/см² при +20° С
					−20	20	
Св-08ГС	30	50	22	50	4,5	10,0	4,0
Св-08Г2С	40	54	20	48	4,0	9,0	4,0

СВАРКА ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ И ПРОВОЛОКАМИ СПЛОШНОГО СЕЧЕНИЯ БЕЗ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

В отечественной сварочной технике в последнее время находит применение способ полуавтоматической сварки порошковыми проволоками, в которых порошкообразное покрытие запрессовывается в оболочку, изготовленную из низкоуглеродистой стальной ленты. В состав покрытия входят шлакообразующие и газообразующие компоненты, ферросплавы, а в некоторых случаях и железный порошок.

Сварку можно производить в нижнем и вертикальном положениях. При сварке обеспечивается хорошее формирование шва, устойчивость процесса и малые потери металла на угар и разбрызгивание. В качестве источников сварочного тока можно использовать преобразователи и выпрямители с крутопадающими внешними вольт-амперными характеристиками. Ориентировочные режимы сварки приведены в табл. 17.

17. Оптимальные диапазоны сварочных токов и рабочих напряжений дуги при сварке порошковыми проволоками (нижнее положение)

Марка порошковой проволоки	Диаметр проволоки в мм	Стыковое соединение			Тавровое соединение «в лодочку»		
		Сварочный ток в *а*	Напряжение на дуге в *в*	Скорость подачи в м/ч	Сварочный ток в *а*	Напряжение на дуге в *в*	Скорость подачи в м/ч
ПП-2ДСК	2,3	400—440	29—31	382	340—380	29—32	382
ПП-АН3	3,2	450—525	26—32	265	450—550	27—31	265
ПП-АН4	2,3	400—480	28—30	382	440—475	30—34	382
ЭПС-15/2	2,5	320—360	28—32	337	320—330	29—32	337

Примечание. Сталь низкоуглеродистая толщиной 10 мм и выше.

Механические свойства металла шва и сварного соединения в зависимости от марки проволоки отвечают требованиям, предъявляемым к электродам типа Э42 и Э50 (табл 18).

18 Механические свойства швов при сварке низкоуглеродистой стали порошковой проволокой

Марка проволоки	Результаты испытаний (средние)						
	σ_t	$\sigma_в$	δ в %	$a_н$ в кгм/см² при температуре в °С			
	в кг/мм²			−20	20	40	−60
ПП-2ГСК	36,0	48,1	30,1	16,3	14,9	13,8	10,1
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	2,7
ПС-2	41,6	50,1	26,6	17,4	13,5	14,6	11,6

В последнее время в промышленности начинает применяться способ сварки электродными проволоками без специальной защиты. Для сварки малоуглеродистых сталей выпускаются проволоки марок ЭП-245(ЧМТУ, ЦНИИЧМ 801-62) и ЭП-439 (ЧМТУ, ЦНИИЧМ 850-62). Сварные соединения имеют механические свойства, как при сварке электродами типа Э-50.

По данным Института электросварки им. Патона, при сварке малоуглеродистых конструкционных сталей электродной проволокой 20ГСЮТ без защиты механические свойства металла шва находятся на уровне свойства шва, выполненного электродами типа Э-50.

Отсутствие флюса или защитного газа значительно упрощает конструкцию сварочных установок и облегчает условия работы сварщиков. Вследствие большой жесткости электродной проволоки не предъявляются какие-либо специальные требования к конструкции механизмов поджатия и подачи ее.

При сварке открытой дугой происходит значительный угар легирующих элементов и насыщение металла шва газами (кислородом, азотом и водородом). Угар элементов компенсируется повышением их содержания в электродной проволоке или введением в ее состав элементов, обладающих большим, чем рассматриваемый, сродством к кислороду. Предотвратить насыщение металла шва газами, и в частности азотом, при сварке без защиты — задача более сложная. В настоящее время она решается снижением их вредного воздействия на свойства металла шва. Кислород связывается в не растворимые в расплавленном металле шлаки, всплывающие на поверхность шва, как и при сварке в углекислом газе. Азот для предотвращения образования нитридов и охрупчивания металла шва переводится в твердый раствор. Это достигается легированием металла шва титаном, алюминием, селеном и другими элементами. Для сварки открытой дугой находят применение также электродные проволоки марок ЭР156 и ЭИ649.

Производительность процесса сварки электродными проволоками без защиты практически такая же, как и при сварке в защитных средах. Однако технологические свойства дуги несколько хуже. Поверхность швов покрыта толстой пленкой окислов, плотно сцепленных с поверхностью шва.

ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ СВАРКА

При изготовлении конструкций из низкоуглеродистых сталей большой толщины, например, котлов, станин прессов, нефтеаппаратуры и др., широко применяют электрошлаковую сварку. При этом равнопрочность соединения достигается за счет легирования металла шва через электродную проволоку,

в качестве которой в основном применяют проволоку с повышенным содержанием марганца марки Св-10Г2 и иногда марки Св-12ГС. При содержании в стали углерода до 0,1% (кроме стали кипящих плавок) равнопрочность металла шва с основным металлом достигается при сварке проволокой Св 08Г и даже Св-08 Сварку можно вести двумя и тремя проволоками разного состава При сварке используют флюсы АН-8 или ФЦ-7. При электрошлаковой сварке обеспечивается равнопрочность металла шва и сварного соединения в состоянии после сварки, отпуска и после нормализации и отпуска. Ударная вязкость металла шва и металла участка перегрева околошовной зоны в состоянии после сварки при комнатной температуре находится на нижнем уровне требований, предъявляемых к основному металлу, а при температуре, ниже комнатной, — обычно не удовлетворяет им

Большой объем работ выполняется электрошлаковой сваркой при изготовлении конструкций из низкоуглеродистой стали толщиной 24—36 *мм*. Обычно сварка производится одной неподвижной электродной проволокой на следующем режиме:

Зазор между свариваемыми кромками в *мм*	23
Диаметр электродной проволоки в *мм*	2,5
Сухой вылет электрода в *мм*	42
Глубина шлаковой ванны в *мм*	20- 25
Максимальная скорость подачи электродной проволоки в *м/ч*	250
Ток в *а*	350 400
Напряжение в *в*	38—42

Сварное соединение, выполненное на этом режиме, равнопрочно основному металлу.

При сварке электродной пластиной или плавящимся мундштуком режим выбирают, учитывая толщину металла и конструкцию сварного соединения и уделяя основное внимание обеспечению стойкости металла шва против кристаллизационных трещин.

КОНТАКТНАЯ СВАРКА

Сварка оплавлением деталей из низкоуглеродистой стали обеспечивает получение соединений весьма высокого качества Предварительный подогрев необходим только в случае сварки деталей большого сечения на машинах сравнительно небольшой мощности для устойчивого оплавления после некоторого разогрева торцов свариваемых деталей

Макроструктура стыка характеризуется отсутствием раковин, пор, трещин, непроваров и неметаллических включений, а также резко выраженной зоной термического влияния сварки и наличием узкой белой полоски на линии стыка, вызванной частичным выгоранием углерода. При сварке стали с содержанием 0,25% углерода непосредственно в стыке количество его может понижаться до 0,1%.

В состоянии после сварки стык характеризуется заметным ростом зерна Иногда наблюдается видманштеттовая структура. При сварке горячекатаной стали твердость в стыке близка к твердости основного металла, а иногда несколько ниже ее вследствие обезуглероживания. При сварке холоднокатаной стали твердость в стыке и зоне термического влияния сварки снижается по сравнению с исходной твердостью основного металла.

Сварной стык на низкоуглеродистой стали, выполненный методом оплавления, обладает без специальной последующей термической обработки высокой прочностью при действии статической, ударной и циклической нагрузок Ударная вязкость образцов с надрезом в плоскости стыка лежит в пределах 6—12 *кГм/см*^{2}. Относительно невысокая ударная вязкость и значительное рассеяние результатов испытаний объясняются крупным зерном в зоне сварного стыка. Показатели

ударной вязкости могут быть существенно улучшены применением термической обработки после сварки (высокого отпуска или нормализации).

Детали из низкоуглеродистой стали толщиной до 6 *мм* успешно свариваются точечной сваркой на машинах серийного выпуска с использованием простейших сварочных циклов: приложенное к электродам усилие остается постоянным на протяжении всего процесса, переменный ток нормальной частоты протекает непрерывно в виде одного импульса. В машинах с педальным приводом чаще применяется цикл с повышенным ковочным давлением. При большей толщине деталей появляется необходимость в применении специальных сварочных циклов и оборудования.

Перед сваркой листы стали очищают от окалины, ржавчины и грязи. Холоднокатаную сталь можно подвергать только обезжириванию. Горячекатаную сталь, имеющую слой окалины, травят в кислоте, подвергают пескоструйной обработке или очищают на наждачном круге. Очистку деталей можно также производить стальной проволочной щеткой, укрепленной на гибком валу. Точечная сварка стали с небольшим слоем окалины возможна, но ведет к понижению стабильности прочностных показателей сварных точек, выплескам, подплавлению поверхности и к значительному сокращению срока службы электродов. Очистку деталей всегда производят с двух сторон.

Низкоуглеродистая сталь относительно малочувствительна к термическому воздействию при сварке. При толщине до 6 *мм* ее можно успешно сваривать как при малой длительности нагрева (жесткий режим), так и при большой (мягкий режим). Сварка на жестких режимах требует использования машин большой мощности, длительность сварки одной точки в зависимости от толщины стали и мощности применяемого оборудования составляет 0,2—1,5 *сек*. Ориентировочные режимы точечной сварки низкоуглеродистой стали приведены в табл. 19 и 20.

19. Режимы точечной сварки низкоуглеродистой стали на серийных автоматических машинах (жесткие режимы)

Толщина каждой детали в *мм*	Диаметр контактной поверхности электрода в *мм*		Длительность включений сварочного тока в *сек*	Усилие на электродах в *кг*	Среднее значение тока в *а*	Тип машины
	начальный	перед заточкой				
0,5	5	6	0,20—0,30	30—40	4000—5000	АТА-20
1,0	5	6	0,20—0,35	80—120	6000—7000	
1,5	6	7	0,25—0,35	120—160	7000—8000	АТА-40
2,2	8	10	0,25—0,35	150—250	9000—10000	
3,0	10	12	0,6—1,0	500—600	12000—16000	АТА-100
4,0	12	14	0,8—1,1	600—800	14000—18000	АТА-175
5,0	12	14	0,9—1,2	700—900	17000—23000	
6,0	14	16	1,1—1,5	900—1200	20000—25000	АТА-175

20. Режимы точечной сварки малоуглеродистой стали на машине типа АТП-16 (мягкие режимы)

Толщина каждой детали в *мм*	Диаметр контактной поверхности электродов в *мм*	Усилие на электродах в *кг*	Длительность включения сварочного тока в *сек*	Ориентировочный ток в сварочной цепи в *а*
1	6	80—100	0,8	4000—5000
1,5	7	100—140	1,0	5000—6000
2	8	120—150	1,5	6000—7500
3	9	140—160	2,0	7500—9000

При сварке деталей неодинаковой толщины режим сварки устанавливают в соответствии с толщиной более тонкой детали с некоторым увеличением силы тока. Такие следует поступить при сварке пакета из трех деталей.

Точечная сварка стали толщиной более 6 *мм* связана с рядом трудностей, большая жесткость деталей требует приложения к электродам значительных усилий, повышается плотность тока вблизи контакта с электродом, в связи с чем при сварке сильно нагревается электрод, что понижает его стойкость. Резко возрастает необходимое для уплотнения ядра ковочное давление. Введение в контур сварочной машины значительных ферромагнитных масс ведет к понижению тока в сварочной цепи, что может являться причиной нестабильности результатов сварки. С увеличением толщины свариваемых деталей растет степень шунтирования тока. При сварке деталей большой толщины необходима значительная электрическая мощность.

В практике находят применение два приема сварки, серией последовательных импульсов тока и током низкой частоты. Сварка импульсами стали толщиной до 10 *мм* имеет целью ограничить нагрев электродов, которые успевают значительно охладиться во время коротких интервалов между следующими друг за другом импульсами сварочного тока. Длительность одного импульса составляет 0,25—0,35 *сек*, пауза между ними 0,8—0,12 *сек*. Число импульсов зависит от мощности машины, определяющей общую длительность сварочного нагрева, и от толщины свариваемых деталей. При сварке одиночной (или первой в узле) точки на деталях толщиной 8 *мм* число импульсов 12 –15 и при сварке последующих точек увеличивается на 50%. Сварка импульсами производится на обычных точечных машинах большой мощности (150 –250 *ква*) и требует при равной суммарной длительности процесса применения больших токов, чем сварка с непрерывным протеканием сварочного тока. В связи с улучшенным охлаждением электродов сварка импульсами допускает применение больших удельных давлений.

Значительно более широкие перспективы промышленного применения имеет сварка стали большой толщины на машинах, питаемых током пониженной частоты (2—4 *гц*). Эти машины присоединяются к трехфазной сети переменного тока нормальной частоты (50 *гц*) через специальную выпрямительную установку. Вследствие малой частоты сварочного тока индуктивное сопротивление вторичной цепи машины относительно мало, а коэффициент мощности установки высок. В результате этого изменение индуктивного сопротивления при введении в контур машины значительных масс ферромагнитного материала незначительно сказывается на величине общего сопротивления сварочного контура и не оказывает заметного влияния на ток в сварочной цепи.

Возможность сварки стали, покрытой слоем окалины, обеспечивается введением дополнительной операции — предварительного сжатия деталей между электродами и подогрева током умеренной силы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по сварке. Под ред. Е. В. Соколова. Т. 1 и 2. М., 1960, 1961.
2. Технология электрической сварки плавлением. Под ред. Б. Е. Патона. М., Машгиз, 1962.
3. Справочник электросварщика. М., Машгиз, 1962.
4. Справочник по специальным работам. Сварочные работы в строительстве. Под ред. В. Д. Тарана. М., Стройиздат, 1962.

ГЛАВА III

СВАРКА КОНСТРУКЦИОННЫХ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ, НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ И ВЫСОКОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СВАРИВАЕМОСТИ

При выборе стали для изготовления сварных конструкций учитывают ряд технических и экономических факторов, и в первую очередь долговечность и надежность сварных соединений в эксплуатации.

Среднеуглеродистые стали. Переход от малоуглеродистой стали Ст. 3 к более прочным сталям с повышенным содержанием углерода не всегда оправдан.

Опыт ряда отраслей машиностроения показывает, что применение среднеуглеродистых сталей 40, 45, Ст. 5, Ст. 6, а тем более 65Г, без последующей термической обработки после сварки нецелесообразно из-за повышенной склонности к образованию холодных трещин при сварке, малопластичных сварных соединений и низкого предела усталостной прочности.

Свариваемость сталей с увеличением содержания углерода ухудшается. Содержание углерода более 0,30% способствует склонности сталей к перегреву и закалке, образованию холодных трещин в сварном соединении и пор в металле шва. Избежать образования трещин и пор при сварке этих сталей можно путем применения предварительного подогрева и последующего высокотемпературного отпуска, а также применением специальных электродов (с малым содержанием водорода). Предварительный подогрев способствует снижению закаливаемости стали, а последующий высокий отпуск улучшает структуру и свойства закаленных зон, а также уменьшает и выравнивает остаточные сварочные напряжения.

Среднеуглеродистые стали применяют для малонагруженных деталей. Детали из этих сталей иногда подвергают после сварки упрочняющей термической обработке (закалке с отпуском) для получения предела прочности 70—90 *кГ/мм²*.

Марганцовистые стали. Взамен среднеуглеродистых сталей целесообразно использование углеродистых, легированных марганцем (до 2,5% Mn) сталей марок 10Г2А и 12Г2А, обеспечивающих получение сварных соединений с пределом прочности 40—90 *кГ/мм²*, обладающих хорошей свариваемостью при всех видах сварки и не склонных к образованию горячих трещин.

Низколегированные стали средней прочности. Особенно целесообразно применение низколегированных сталей взамен среднеуглеродистых при изготовлении сварных конструкций в машиностроении. Это технически и экономически во многих случаях оправдано, так как обеспечивает снижение веса конструкций и позволяет повысить надежность сварных деталей и изделий.

Низколегированные конструкционные стали отличаются повышенной прочностью при комнатной температуре, отсутствием склонности к старению, коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, не чувствительны к хрупкому разрушению при отрицательных температурах, их можно применять при повы-

шенных (до 500° С) температурах. В качестве конструктивных мер, уменьшающих склонность к хрупкому разрушению, рекомендуется:

1) снижать скопление швов и сокращать до минимума количество пересекающихся и близ расположенных сварных швов, могущих вызывать объемные остаточные сварочные напряжения;

2) не допускать сварные соединения с проплавами. Избегать постановку излишних ребер жесткости, косынок и т. д., увеличивающих жесткость изделия.

Исследования и опыт эксплуатации сварных деталей и конструкций из низколегированных сталей показывают, что в некоторых случаях разрушения происходят вследствие концентрации напряжений, появления значительных по величине остаточных сварочных напряжений и снижения пластичности металла. Указанные причины могут сильнее проявить себя в результате конструктивных недостатков, неправильного выбора свариваемых материалов, способов сварки и технологии. В этом случае усталостная прочность сварных соединений значительно ниже основного металла.

Общепринятого критерия оценки пригодности конструкционных сталей к изготовлению сварных деталей и конструкций пока нет. При выборе сталей для сварных деталей и конструкций руководствуются прежде всего механическими свойствами основного металла и сварных соединений, а также технологичностью (штампуемостью, сопротивляемостью к горячим и холодным трещинам при сварке и т. п.) термообрабатываемостью, механической обрабатываемостью, трудоемкостью и т. п. Надежность и долговечность сварных соединений являются основными и главными критериями в вопросе выбора марки сталей и способов изготовления сварных изделий.

Широкое применение в промышленности при изготовлении сварных деталей и изделий получили низколегированные стали перлитного класса типа ХГСА с меньшим или большим содержанием углерода марок 25ХГСА и 30ХГСА.

Конструкционные низколегированные стали перлитного класса в зависимости от видов термической обработки имеют следующие микроструктуры:

при отжиге — феррито-перлитную,

при закалке — мартенситную или троосто-мартенситную;

при отпуске закаленной стали — троосто-мартенситную, троститную, троосто-сорбитную и сорбитную.

Для изготовления сварных деталей из сталей 25ХГСА и 30ХГСА с пределом прочности 110—130 $кГ/мм^2$ применяют после сварки термическую обработку (закалку и отпуск). Детали больших габаритных размеров целесообразно изготовлять из предварительно термически обработанных элементов. Эти стали особенно рекомендуется применять в тех случаях, когда необходимы хорошая свариваемость и значительная пластическая деформация деталей в процессе изготовления.

Стали 12Х2НВФА (ЭИ712) и 23Х2НВФА (ЭИ659) упрочняются путем термической обработки (закалки в масле с отпуском или нормализации с отпуском). Они рекомендуются для изготовления конструкций из термически обработанных элементов соответственно с $\sigma_в \geqslant 100$ $кГ/мм^2$ и $\sigma_в \geqslant 115$ $кГ/мм^2$, работающих при повышенных температурах (до 500° С); допускается термическая обработка после сварки.

Низколегированные высокопрочные стали. К конструированию сварных деталей из конструкционных низколегированных высокопрочных сталей и технологии их изготовления предъявляются повышенные требования, нарушение которых может привести к хрупкому разрушению деталей.

Необходимо учитывать повышенную чувствительность этих сталей к концентраторам напряжений при статических и, особенно, при динамических (повторных статических, вибрационных и ударных) нагрузках. Поэтому 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, а если возможно, то и проплав или подкладку со стороны проплава. В тех случаях, когда механическая обработка внутренней поверхности деталей невозможна, следует производить комбинированную сварку без остающейся подкладки. При этом первый слой шва выполняют автоматической аргоно-дуговой сваркой неплавящимся электродом без присадки с обеспечением 100%-ного равномерного проплавления по всей длине шва. Последующие слои наносят ручной дуговой сваркой или сваркой под флюсом. Рекомендуется сварка встык. Сварка внахлестку, а также проектирование замковых соединений не разрешается. Тавровые соединения должны выполняться с полным проваром и двусторонней галтелью с плавными переходами к основному металлу.

Сварные детали из конструкционных низколегированных высокопрочных сталей рекомендуется изготовлять из металла вакуумного дугового переплава или выплавленного методом прямого восстановления. Вакуумный переплав позволяет улучшить механические свойства стали, особенно в поперечном волокну направлении, и практически устранить металлургические дефекты (волосовины, грубые неметаллические включения и т. д.) Стали вакуумного переплава содержат меньше газов и неметаллических включений по сравнению с исходным состоянием. В связи с этим повышаются пластические свойства.

Высокопрочная сталь 30ХГСНА является низколегированной сталью перлитного класса. Детали из этой стали могут обрабатываться на следующие пределы прочности:

160—180 *кГ/мм*^{2} — после закалки в масле с последующим низким отпуском или после изотермической закалки с низким отпуском;

150—170 *кГ/мм*^{2}, 140—160 *кГ/мм*^{2} — 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 предназначается для ответственных сварных деталей со следующими ограничениями по наибольшей толщине: цилиндр или квадрат — до 80 *мм*; профили — до 60 *мм*; листы и трубы с двусторонним охлаждением — до 40 *мм*; трубы с односторонним охлаждением — до 20 *мм*.

Конструкции можно подвергать термической обработке (закалке) после сварки, а также изготовлять из термически обработанных (закаленных) элементов. Прочность сварного шва зависит от толщины свариваемой детали (табл. 1) Для достижения равнопрочности с основным материалом сварное соединение должно иметь утолщенные кромки.

Низколегированные стали 30Х2ГСНВМ (ВЛ1-Д) и 42Х2ГСНМ (ВКС-1) мартенситного класса способны закаливаться на воздухе и сохранять высокий предел прочности при работе до 300° С. Их применяют для изготовления обечаек емкостей ответственного назначения, работающих кратковременно под давлением при температуре до 300° С и подвергающихся термической обработке (закалке с отпуском) после сварки. Допустима сварка в окончательно упрочненном состоянии только кольцевых швов при утолщенных кромках в местах сварки.

Конструкционные низколегированные стали марок КВК-26, КВК-32, КВК-37 и КВК-42 мартенситного класса, отличающиеся друг от друга содержанием углерода (табл. 2), относятся к сталям, получаемым методом прямого восстановления. При этом применяется комплексное легирование и микролегирование (B, Nb, Ti). Они имеют низкое содержание серы и фосфора, а также других вредных примесей, отличаются повышенной чистотой по газонасыщенности и неметаллическим включениям. Надежность таких сталей, определяемая прочностью при наличии трещин и других повреждений поверхности, выше, чем выплавленных на обычной шихте; температура порога хладоломкости сдвигается в сторону более низких температур.

1 Прочность сварных швов (без учета усиления) стали 30ХГСНА ($\sigma_в$ — 160 — 180 *кГ/мм²*) в зависимости от свариваемой толщины

Толщина в *мм*	$\sigma_в$ швов в *кГ/мм²*	
	Термическая обработка после сварки [1]	Сварка закаленных элементов [1]
До 10	120	60
» 15	100	60
» 25	80	50

[1] Используемые при сварке материалы (электроды, присадочная проволока, флюсы) указаны на стр. 64, 66, 70

2 Пределы прочности при растяжении и конструктивная прочность стали типа КВК в зависимости от содержания углерода

Марка стали	С в %	$\sigma_в$	$\sigma_к$
		в *кГ/мм²*	
КВК-26	0,23 - 0,28	140 - 160	155 - 175
КВК-32	0,29 - 0,34	160 - 180	175 - 190
КВК-37	0,35—0,39	170 - 190	185 - 210
КВК-42	0,40—0,44	190 - 215	210 - 240

Стали типа КВК применяют для изготовления емкостей, работающих кратковременно под внутренним давлением. Сталь КВК-42 используют для раскатных бесшовных обечаек емкостей; из стали КВК-37 изготовляют сварные и раскатные бесшовные обечайки, емкости без значительных концентраций напряжений; стали КВК-32 и КВК-26 применяют для емкостей (сварных и бесшовных обечаек, узлов, полусфер), а также паробаллонов и других деталей.

В Советском Союзе и за границей во многих отраслях машиностроения долгое время избегали применения для сварных изделий низколегированных сталей с пределом прочности 100—120 *кГ/мм²*, а тем более 160 —180 *кГ/мм²*. Основным препятствием к широкому их использованию для сварных изделий многие специалисты считали образование в сварном соединении закаленных зон со структурой мартенсита.

Решение проблемы сварки таких сталей возможно двумя путями:

1) стали легируют так, чтобы температура мартенситного превращения была достаточно высокой, в связи с этим образовавшийся при сварке мартенсит мог подвергаться отпуску в процессе охлаждения до комнатной температуры;

2) при охлаждении в процессе сварки стремятся создать термический цикл, способствующий образованию отпущенного мартенсита.

Игнорирование этих положений приводит к опасности образования закалочных трещин.

При сварке малоуглеродистых низколегированных не закаливающихся в процессе сварки сталей после завершения распада аустенита структура благоприятна — пластинчатый перлит, обладающий высокими пластическими свойствами. В углеродистых низколегированных сталях процесс распада аустенита начинается при более низких температурах и заканчивается при комнатной температуре, пластичность сварного соединения таких сталей низкая.

Стали, чувствительные к резкой закалке, имеющие в процессе сварки структуру мартенсита и остаточного аустенита при повышенной концентрации водорода, при действии внутренних напряжений весьма чувствительны к образованию холодных трещин.

Содержание в стали более 0,25% углерода при наличии легирующих элементов приводит к образованию закаленной структуры - мартенсита. О свариваемости стали с точки зрения 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.

Исследованиями и опытом эксплуатации сварных изделий доказано, что сварные соединения высокопрочных низколегированных сталей типа ХГСА и ХГСНА со структурой мартенсита при определенных условиях надежны при циклических нагрузках.

Структура мартенсита в сварном соединении не опасна при сварке и в эксплуатации, если правильно выбран способ сварки, присадочный материал, не нарушены оптимальные условия технологии изготовления сварного изделия, устранены концентраторы напряжения путем создания плавных переходов от шва к основному металлу или созданы благоприятные условия в сварном соединении, снижающие чувствительность к концентраторам напряжения: применение аустенитных присадок или поверхностная обработка путем наклепа. Высокоуглеродистый мартенсит в околошовной зоне сварного соединения опасен при наличии резких переходов от шва к основному металлу, т. е. концентраторов напряжений. Сварное соединение ненадежно, если шов выполнен низколегированной проволокой, обеспечивающей мартенситно-ферритную структуру шва, или аустенитной проволокой типа Св-06Х18Н9Т, Св-13Х25Н18, Св-08Х20Н10Г6 с малым запасом аустенитности. Такой шов имеет аустенитно-мартенситную структуру (высокоуглеродистый мартенсит), обладает низкой пластичностью и ударной вязкостью и не надежен в эксплуатации при повторных статических нагрузках. Аустенитную структуру металлу шва обеспечивают присадки типа Св-10Х16Н25М6, ЭИ334, ЭИ435.

Для исключения образования трещин сварку низколегированных сталей, закаливающихся в процессе сварки, приходится вести по технологии, отличающейся от технологии сварки обычных малоуглеродистых сталей.

Методами борьбы с образованием трещин при сварке закаливающихся сталей являются:

1) уменьшение закаливаемости металла при сварке применением подогрева;
2) снижение содержания водорода в сварном соединении;
3) отпуск после сварки;
4) применение различных технологических приемов и приспособлений, позволяющих улучшить структуру сварного соединения и снизить остаточные напряжения растяжения.

Создание специальным приспособлением при высоких температурах сжимающих напряжений в сварном соединении исключает дополнительные растягивающие напряжения при снижении температуры.

Подогрев стали перед сваркой зависит от химического состава стали и в первую очередь от содержания углерода, применяемого способа и режима сварки. Влияние других элементов, в частности — легирующих, снижающих скорость распада аустенита, оценивается пересчетом их количества в количество, как бы эквивалентное действию углерода по приведенной выше формуле для $C_э$. Содержание меди учитывается при $\geqslant 0{,}5\%$ Cu, фосфора при $\geqslant 0{,}05\%$ P.

В США рекомендуют применять подогрев при $C_э$ больше 0,45—0,55%.

В формуле, предложенной Д. Сефериаком, учитывается не только химический состав, но и толщина свариваемой стали. Влияние толщины свариваемого металла (δ в *мм*) учитывается поправкой к $C_э$

$$C'_э = 0{,}005\delta C_э.$$

Тогда полный эквивалент углерода

$$C''_э = C_э + C'_э = C_э(1 + 0{,}005\delta),$$

а температура подогрева

$$T_{под} = 350 \sqrt{C_э^{III} - 0{,}25}.$$

В отличие от зарубежной практики разработаны и находят применение способы сварки низколегированных сталей повышенной прочности с бо́льшим эквивалентным углеродом ($C_э \approx 0{,}70\%$) без подогрева. При этом применяется дуговая сварка низководородистыми электродами и специальная технология, улучшающая структуру металла шва и околошовной зоны — сварка с отжигающим валиком.

Перед сваркой электроды следует подвергать вакуумному отжигу. При сварке с отжигающими валиками заполнение разделки выполняют многослойными швами короткими участками, применяя наложение швов так называемыми блоками, горкой и каскадом (см. т. II, стр. 182).

Величину участков, завариваемых при выполнении сварки каскадом, выбирают практическим подбором или расчетом по формуле

$$l = 0{,}7\frac{k_з^2 k_ρ q^2}{\delta^2 v_{св}(T_в - T_0)},$$

где $k_з$ — коэффициент, принимаемый для соединений встык 1,5; втавр 0,9, крестового 0,8;

$k_ρ$ — коэффициент горения дуги, $k_ρ = 0{,}6 \div 0{,}8$;

T_0 — начальная температура изделия в °С;

$T_в$ — допустимая температура охлаждения после сварки предыдущего слоя; несколько выше температуры, опасной для образования трещин.

При медленном процессе сварки и большой погонной энергии (под слоем флюса и электрошлаковая) запас тепла обеспечивает и без подогрева благоприятные скорости охлаждения сварного соединения из сталей 30ХГСА и 30ХГСНА.

Отпуск сварных конструкций из легированных сталей снимает остаточные сварочные напряжения растяжения, улучшает структуру и свойства металла шва, снижает твердость закаленных зон сварного соединения и устраняет их склонность к образованию холодных трещин со временем. Охлаждение сварных соединений до комнатной температуры без отпуска вызывает распад аустенита с получением неотпущенного высокоуглеродистого мартенсита, хрупкого и склонного к замедленному разрушению под влиянием остаточных напряжений. В связи с этим до термической обработки у сталей некоторых марок в сварных соединениях могут образоваться холодные трещины. Поэтому перерыв между началом сварки и термообработкой в зависимости от марки стали различный — от 30 *мин* до нескольких часов. В тех случаях, когда затруднено немедленное проведение высокого отпуска (местный т. в. ч. или общий в печи), применяют предварительно низкий отпуск при температуре 250—300° С или местный отпуск газовым пламенем с последующим высоким отпуском в печи.

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Прочность сварного соединения низколегированной стали, не подвергнутого термической обработке, зависит от того, насколько изменяется структура и прочность основного металла в околошовной зоне и металла шва под влиянием нагрева при сварке. Слабой зоной сварных соединений из закаленных до сварки элементов является зона высокого отпуска. Прочность металла в этой зоне и ширина последней зависит от марки стали и от 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 меньше ослабление прочности основного металла. Например, в процессе

сварки сталь ЭИ712 не разупрочняется, так как она более теплоустойчива, а сталь 30ХГСА менее теплоустойчива и разупрочняется на 20%.

При газовой сварке сталей типа 30ХГСА понижение механических свойств больше, чем при дуговой, и зона термического влияния распространяется на ширину 30—80 *мм* в зависимости от толщины и протяженности сварных швов. Зона отпуска в сварных соединениях, выполненных дуговой сваркой, находится в 4—5 *мм* от линии сплавления при толщине материала 3 *мм*. После сварки конструкций элементы, термически обработанные на $\sigma_в$ = = 120 *кГ/мм*^{2} обладают пределом прочности при дуговой сварке 100—110 *кГ/мм*^{2} и при газовой 65—70 *кГ/мм*^{2}; чем медленнее протекает процесс сварки и чем толще материал, тем шире зоны и тем значительнее изменение структуры и механических свойств сварного соединения.

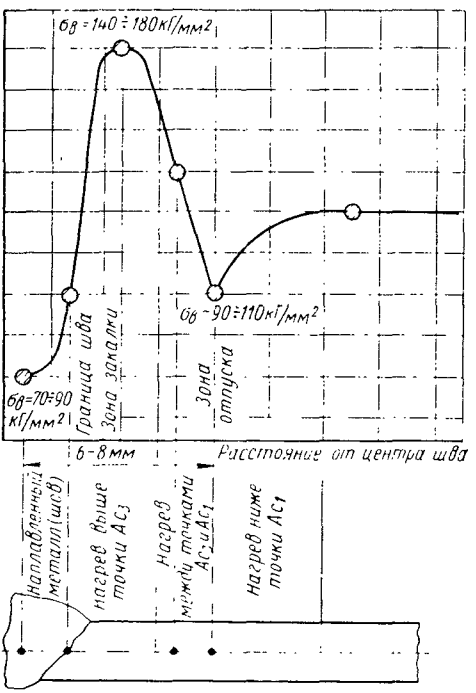


Рис. 1. Зоны теплового воздействия и изменение твердости при дуговой сварке стали 30ХГСА

В сварном соединении низколегированных сталей различают три зоны теплового воздействия и изменения механических свойств и структуры (рис. 1).

1. От верхней критической точки Ac_3 и выше до температуры плавления металла. В зависимости от марки стали и способа сварки в этой зоне металл воспринимает закалку на различный предел прочности, вследствие быстрого отвода тепла основным металлом и окружающей средой. Сталь 30ХГСА в этой зоне воспринимает закалку как при дуговой, так и при газовой сварке. При дуговой сварке — структура мартенситно-сорбитная, при газовой — сорбитная.

2. Между нижней Ac_1 и верхней Ac_3 критической точками. Распространяющееся тепло в этой зоне вызывает постепенное снижение твердости: от закаленного состояния (точка Ac_3) до состояния полного отпуска в так называемой зоне высокого отпуска (нагрев до температуры Ac_1).

3. Ниже точки Ac_1. Тепло от сварки влияет на прочность металла в этой зоне тем меньше, чем дальше участок расположен от сварного шва.

В переходной зоне сварного соединения, выполненного дуговой сваркой на стали 30ХГСА, обладающей повышенной склонностью к закалке, структура представляет собой крупноигольчатый мартенсит, прочность металла достигает 180 *кГ/мм*^{2}, а у стали 30ХМА, имеющей меньшую восприимчивость к закалке, структура троосто-мартенситная и прочность металла в этой зоне не превышает 140 *кГ/мм*^{2}.

Изменение твердости по зонам сварного соединения при дуговой, газовой и атомноводородной сварке стали 30ХГСА, предварительно термически обработанной на $\sigma_в$ = 120 *кГ/мм*^{2}, приведено на рис. 2. Твердость и прочность металла в зонах сварного соединения зависят от верхнего и нижнего пределов по содержанию углерода, хрома, марганца и кремния в стали. Разброс прочности для

стали 30ХГСА составляет 15—20 *кГ/мм*² (рис. 3). Снижение прочности металла в зоне высокого отпуска зависит от первоначальной прочности и предварительной термической обработки. Значение прочности в зоне закалки (нагрев выше точки Ac_3) одинаково для стали одной и той же марки и не зависит от прочности до сварки. Снижение прочности металла в зоне высокого отпуска связано с прочностью основного металла до сварки (табл. 3).

Механические свойства сварного соединения находятся в прямой зависимости от структуры металла шва. Сварные швы, выполненные с применением легированной проволоки Св-18ХМА, по сравнению со швами с присадкой Св-08А, вследствие повышенного содержания углерода и легирующих элементов, более склонны к закалке; металл шва характеризуется мелкой сорбитной структурой и имеет более высокую прочность. Структура металла шва при использовании

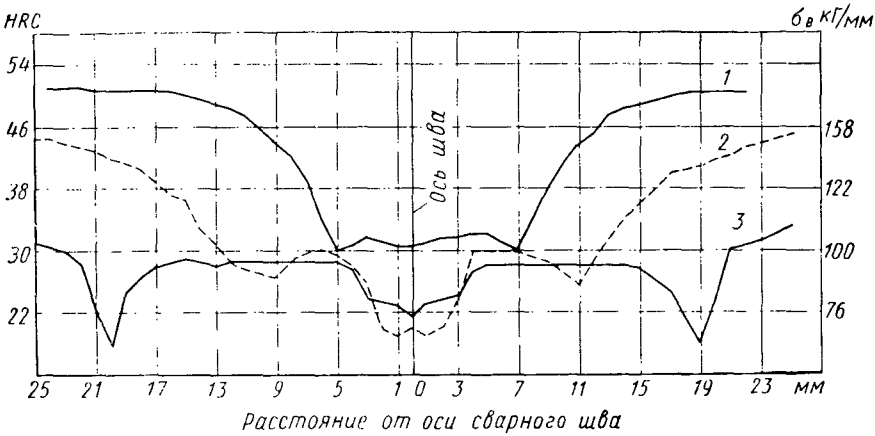


Рис. 2. Изменение твердости по зонам сварных соединений на закаленных элементах: *1* —ручная дуговая сварка; *2* — атомноводородная сварка; *3* — газовая сварка

присадки Св-08А представляет собой феррит с незначительным количеством перлита.

Опасность разрушения сварных изделий при понижении температуры возрастает. Началом разрушения являются технологические дефекты швов — непровары и трещины, а также резкие переходы от усиления шва к основному материалу и другие концентраторы напряжений. При этом образцы для стандартных механических испытаний основного металла и сварных соединений могут иметь высокую прочность, удовлетворительную пластичность и вязкое разрушение.

Хрупкие разрушения сварных конструкций возникают в результате наличия острых концентраторов напряжений, расположенных поперек поля высоких местных растягивающих напряжений. При определенной температуре металл вблизи надреза переходит в хрупкое состояние. Низколегированные стали обладают заметно более высокой склонностью к хрупкому разрушению по сравнению с обычными малоуглеродистыми конструкционными сталями. Также замечено, что элементы больших сечений в большей степени подвержены хрупким разрушениям, чем более тонкие. Пластические деформации при сварке, правке, перегрузке конструкций могут значительно увеличить хрупкость металла.

Известно, что с понижением температуры как для основного материала, так и для сварных соединений предел текучести, предел пропорциональности, сопротивление разрыву, твердость, предел усталости повышаются, а относительное удлинение, поперечное сужение и ударная вязкость понижаются (табл. 4).

Сварные швы на стали 30ХГСНА, выполненные ручной дуговой сваркой электродами ВИ10-6 (Св-18ХМА), характеризуются непостоянными значениями ударной вязкости при низких температурах. В некоторых случаях она снижается с 4—5 *кГм/см²* при +20° С до 2,5—3,6 при —40° С и 0,8—1,8 *кГм/см²* при —70° С; в других случаях с 7,5—9,8 при +20° С до 6,9—7,9 при —40° С и 5,7—5,9 *кГм/см²* при —70° С (т. е. незначительно).

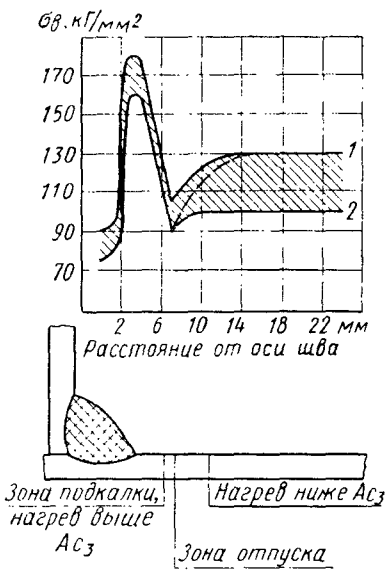


Рис. 3. Изменение прочности стали 30ХГСА по зонам теплового воздействия при дуговой сварке в зависимости от содержания углерода, хрома, марганца и кремния в стали: *1* — с содержанием компонентов по верхнему пределу; *2* — с содержанием компонентов по нижнему пределу

Различная чувствительность металла сварных швов к низким температурам проявляется также при повторном статическом изгибе. Если металл шва не чувствителен к низким температурам, то его прочность при повторных статических нагрузках повышается с понижением температуры. В этом случае кривые прочности для комнатной и низкой температур имеют почти одинаковый угол наклона к оси ординат, что свидетельствует об одинаковой чувствительности металла шва к повторным статическим нагрузкам при этих температурах (рис. 4, *а*). Если металл шва обладает повышенной чувствительностью к низким температурам, то кривая, характеризующая его прочность при повторных статических нагрузках в условиях низких температур, имеет более резкий наклон, что указывает на большую чувствительность металла шва к повторным статическим нагрузкам (рис. 4, *б*). Для таких сварных швов не установлено различия в химическом составе, в критических точках превращения и количестве остаточного аустенита. Наблюдается различие только в структуре: металл швов, чувствительных к низким температурам, — сорбит с грубым строением; выделения феррита и цементита — крупные и имеют игловидное строение (рис. 5). Первичная структура такого шва отличается значительной дендритной неоднородностью, оси дендритов утолщены. Металл шва, не чувствительный к низким температурам, имеет структуру более благоприятную — сорбит с более тонким строением

3. Предел прочности (в *кГ/мм²*) сварного соединения в зоне высокого отпуска, выполненного на стали 30ХГСА дуговой сваркой, в зависимости от прочности основного металла. Электроды ВИ 10-6 (Св-18ХМА)

Основной металл до сварки	Сварное соединение в зоне высокого отпуска
130	110—100
110—100	95—85
70—80	70—80

4. Ударная вязкость основного металла и сварных соединений стали 30ХГСА толщиной 6 *мм* при низких температурах

Температура испытания в °С	$a_н$ в *кГм/см²*		
	Основной металл	Сварные образцы с надрезом	
		по шву	по линии сплавления
+20	5,1	4,2	4,1
−40	4,0	4,0	3,2
−70	3,0	2,0	3,0
−196	0,9	1,2	0,7

и с более округлыми выделениями феррита и цементита (рис. 6). В первичной структуре менее выражена химическая неоднородность.

Применение двойной термической обработки (изотермической закалки или нормализации и изотермической закалки) устраняет чувствительность сварных швов к низким температурам и повышает ударную вязкость их как при комнатной, так и при низких температурах. Положительное влияние повторной термической обработки объясняется ее положительным влиянием на выравнивание химической неоднородности металла шва. Отжиг сварных швов в вакууме так же, как и двойная термическая обработка, повышает характеристики пластичности сварных соединений при низкой температуре.

При одноразовом испытании сварных соединений низколегированных сталей на статический разрыв и ударную вязкость не выявляются полностью различия между прочностью основного металла и сварного соединения в зависимости от способа сварки, а тем самым и влияние способов сварки на надежность сварных изделий в эксплуатации. Однако сварные детали и конструкции в эксплуатации иногда разрушаются преждевременно и при нагрузках, не превышающих расчетные. При этом характер разрушения иной, чем при статическом нагружении.

При испытании сварных соединений трубчатых элементов конструкций из стали 30ХГСА, выполненных различными видами сварки, наиболее характерными местами разрушения являются: а) прорези во врезных элементах; б) места соединений элементов, образующих между собой углы 45 и менее.

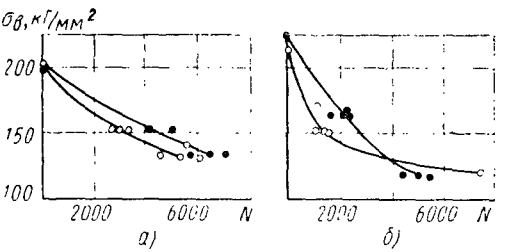


Рис. 4. Прочность при повторном изгибе сварных швов, выполненных на стали 30ХГСНА ручной дуговой сваркой электродами ВИ10-6 (Св-18ХМА): ○ 0 — −20° С; ● 0 — −70° С; *а* — металл шва не чувствителен к низким температурам; *б* — металл шва с повышенной чувствительностью к низким температурам

В процессе нагружения в местах концентрации напряжений появляются первые трещины (при испытании сварных соединений трубчатых элементов во врезных соединениях и под раскосом). Для повышения надежности сварных соединений необходимо уменьшить местную концентрацию напряжений.

Влияние вида сварки, формы шва можно проследить по результатам испытания трубчатых узлов из стали 30ХГСА на знакопеременный изгиб. Узлы, сваренные дуговой, газовой и комбинированной сваркой, подвергались до и после сварки термической обработке на предел прочности 120 ± 10 *кГ/мм*². Разрушения происходят по переходной зоне сварного соединения основной трубы пояса под раскосом. Испытания трубчатых элементов подтверждают зависимость предела выносливости от способа сварки и в первую очередь от формы сварного шва. Предел усталости узлов, сваренных ручной дуговой сваркой с последующей термической обработкой, равен 5 *кГ/мм*², а при газовой сварке — 9 *кГ/мм*² (рис. 7). Это объясняется тем, что сварное соединение, выполненное газовой сваркой, имеет более плавный переход от шва к основному металлу, чем выполненное дуговой сваркой. В табл. 5 приведены результаты испытания на вибрацию указанных узлов.

При дуговой сварке предел выносливости узла со стойкой в 2—3 раза выше предела усталости узла с раскосом. В этом случае сварной шов при дуговой сварке имеет радиус перехода около 12 *мм*, примерно такой же, как при газовой сварке (рис. 8).

Влияние формы шва на величину концентрации напряжения наглядно подтверждается оптическим методом на прозрачных моделях. С увеличением

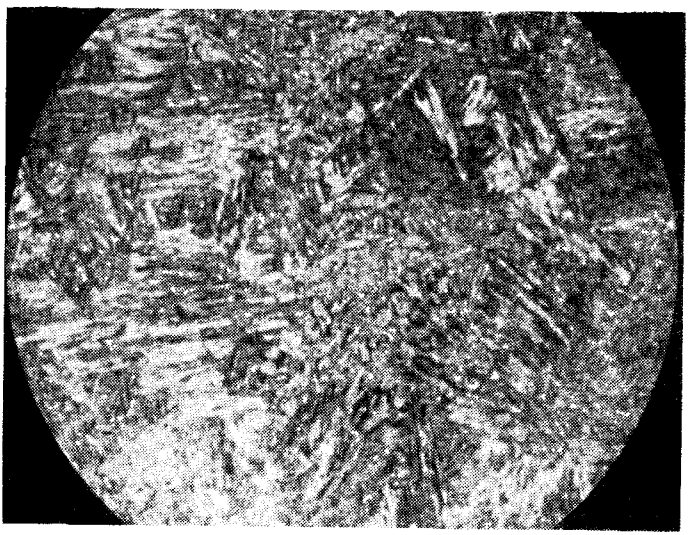


Рис. 5. Микроструктура металла шва, обладающего низкой ударной вязкостью при —70° С (×300)

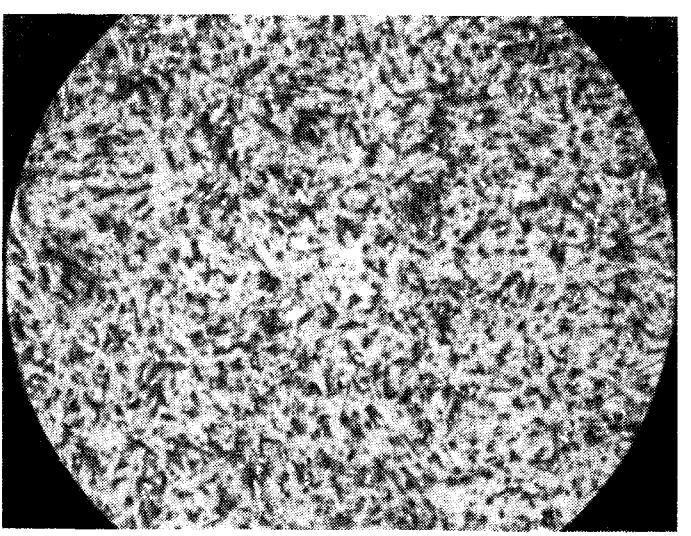


Рис. 6. Микроструктура металла шва, малочувствительного к снижению температуры (×300)

радиуса закругления R в месте перехода шва к основному металлу коэффициент концентрации уменьшается и при дуговой сварке «с усом» (R 15 мм) он приближается к единице (рис. 9). Снижение концентрации напряжений, установлен-

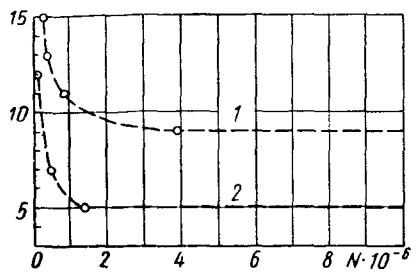


Рис. 7. Предел выносливости типовых трубчатых узлов из стали 30ХГСА: *1* — газовая сварка; *2* — ручная дуговая сварка

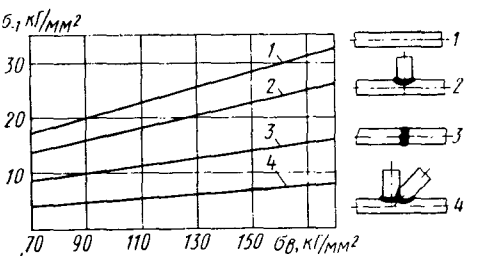


Рис. 8. Зависимость предела выносливости от формы трубчатого сварного соединения

ное оптическим методом, подтверждается поведением сварных узлов при испытании на выносливость. Трубчатый узел разрушается, как правило, под раскосом, где радиус закругления шва обычно меньше, чем у шва со стороны стойки. Для повышения циклической прочности трубчатых соединений необходимо улучшать переход от наплавленного металла к основному на участке шва под

5. Предел выносливости сварных трубчатых узлов из стали 30ХГСА, термически обработанных после сварки на предел прочности 120 ± 15 *кГ/мм²*

Способ сварки	Электроды и присадочные материалы	σ_1 в *кГ/мм²*
Ручная дуговая	Электроды марки ВИ9-6 (СВ-18ХМА)	6
Газовая	Присадочная проволока Св-18ХМА	9
Комбинированная	Основные швы: ручной дуговой сваркой электродами марки ВИ9-6 (стержень СВ-18ХМА); заделка газовой сваркой (присадочная проволока марки Св-18ХМА)	9

раскосом, что возможно применением заплавки шва или комбинированной сварки. В последнем случае детали соединяют электрической дуговой сваркой; места, где имеется значительная концентрация напряжений, выполняют газовой, атомноводородной или аргоно-дуговой сваркой (рис. 10).

Остаточные сварочные напряжения не оказывают сколько-нибудь заметного влияния на сопротивление разрушению при статических нагружениях элементов конструкции, если металл обладает *способностью к пластической деформации*. При низких температурах они резко (в 1,5—2 раза) снижают статическую *прочность*. Остаточные напряжения в готовых конструкциях снимают преимущественно термической обработкой — отпуск при повышенной температуре (650°С) всего изделия в печи или местных зон сварного соединения токами высокой частоты.

Влияние остаточных напряжений на выносливость сварного соединения зависит от величины, знака и характера распределения этих напряжений и формы сварного соединения. Предел усталости сварных соединений в значительной

степени зависит от величины и знака остаточных напряжений. Созданием остаточных напряжений сжатия в сварных соединениях можно значительно повысить предел усталости. Применение азотирования сварных соединений из стали 30ХГСА повышает предел выносливости соединений в 2 раза (рис. 11). При азотировании стали создаются остаточные напряжения сжатия; поверхностные сжимающие напряжения доходят до 50 и даже до 70—93 $кГ/мм^2$; усталостная прочность повышается на 15—50%.

В большинстве случаев защитные покрытия отрицательно сказываются на пределе усталости. В металлических покрытиях при гальванической обработке возникают, как правило, растягивающие напряже



Рис. 9. Модели из оптического активного материала сварного соединения: *а* — при газовой сварке $R = 6$ *мм*, $K = 1{,}4$ — коэффициент концентрации (теоретический); *б* — при ручной дуговой сварке $R = 0{,}5 \div 3{,}5$; $K = 1{,}97 \div 1{,}86$; *в* — при ручной дуговой сварке «с усом» $R \geqslant 1{,}5$; $K = 1{,}02$

ния и насыщение водородом. В связи с этим для сварных соединений из высокопрочных сталей хромирование и никелирование не применяют. Защищать

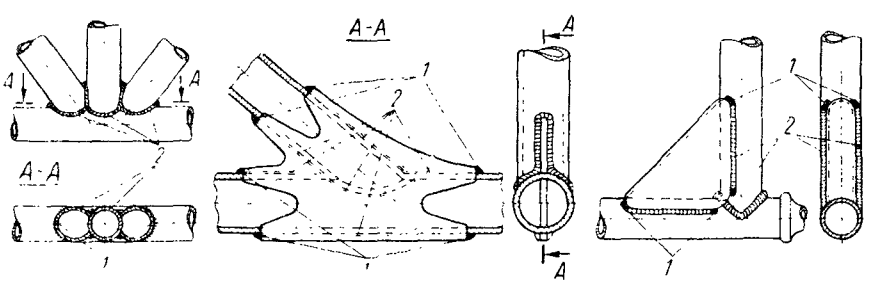


Рис. 10. Комбинированная сварка: *1* — газовая, атомноводородная или аргоно-дуговая; *2* — ручная дуговая

поверхность сварных соединений из высокопрочных сталей от воздействия влаги и воздуха следует металлизацией и лакокрасочными покрытиями.

Механическая обработка сварных швов оказывает благоприятное влияние, устраняя концентраторы напряжения. Однако влияет она различно: при шлифо-

вании получается менее благоприятный рельеф (острые впадины малого радиуса), при фрезеровании — более благоприятный; остаточные напряжения при шлифовании создают напряжения растяжения, при фрезеровании — напряжения сжатия.

Обезуглероживание в результате несовершенства нагрева под термическую обработку снижает предел выносливости сварных соединений (в низколегированных сталях до 20%, в высокопрочных — до 77%).

Методы поверхностной обработки: виброналклеп, обработка дробью, обкатка роликами, наклеп пневмомолотком снимают остаточные напряжения растяжения и создают напряжения сжатия, улучшают поверхность, устраняют концентраторы. В результате этого повышается предел выносливости и повторная статическая прочность сварных соединений. Так, проковка сварных стыковых соединений снижает продольные сварочные остаточные напряжения на 75%. Проковка перекрестных швов снижает остаточные сварочные напряжения в месте их пересечения в 2—4 раза.

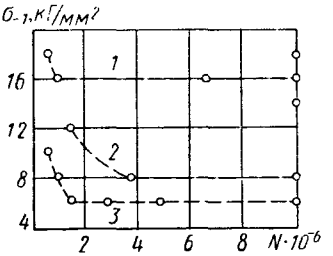


Рис. 11. Влияние азотирования на выносливость сварных соединений типовых трубчатых узлов, выполненных комбинированной сваркой (дуговая сварка с газовой заделкой): *1* — азотирование после сварки; *2* — без азотирования; *3* — азотирование до сварки

МВТУ им. Баумана предложен метод обкатки роликами зоны сварного соединения, которая изменяет распределение остаточных напряжений, создает в верхних слоях напряжение сжатия и упрочняет поверхность благодаря наклепу.

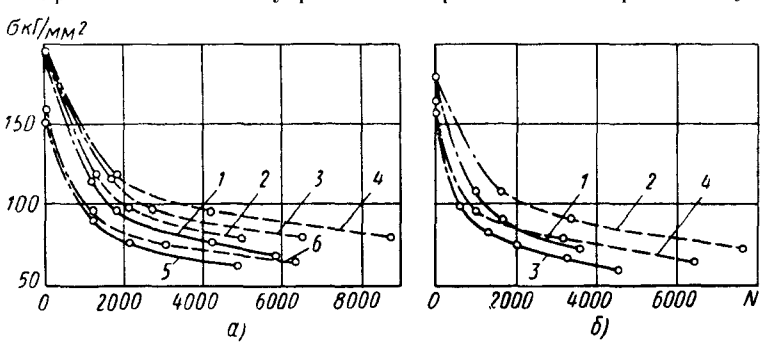


Рис. 12. Влияние наклепа дробью на повторно-статическую прочность при изгибе: *а* — ДЭС, электроды ВИ10-6 (Св-18ХМА); термообработка после сварки на $\sigma_в$ = 120 *кГ/мм²*: *1* — без наклепа: *2* — наклеп дробью, v = 5 *м/сек*, T = 3 *мин*; *3* — наклеп молотком 4КМ, p = 3 *кГ/см²*; *4* — наклеп молотком, p — 5 *кГ/см²*; термообработка до сварки на $\sigma_в$ = 120 *кГ/мм²*, образцы, разрушающиеся в зоне минимальной прочности: *5* — без наклепа; *6* — наклеп молотком, p — 5 *кГ/см²*; *б* — ДЭС, электроды ЭИ334 (ВИ12-6); термообработка после сварки на $\sigma_в$ = 120 *кГ/мм²*: *1* — без наклепа; *2* — наклеп молотком, p — 5 *кГ/см²*; газовая сварка, присадка 18ХМА, термообработка до сварки на $\sigma_в$ = 120 *кГ/мм²*: *3* — без наклепа: *4* — наклеп молотком p = 5 *кГ/см²*

Поверхностный наклеп является эффективным средством повышения прочности и долговечности сварных соединений низколегированных и высокопрочных сталей при повторных статических и вибрационных нагрузках. Наклеп дробью и пневмомолотком не оказывает существенного влияния на предел прочности, не снижает ударную вязкость и не повышает склонности к хрупкому

разрушению, однако обеспечивает получение высокого упрочняющего эффекта при повторных статических нагрузках (рис. 12 и 13) и повышение вибрационной прочности сварных соединений (рис. 14). Предел выносливости сварных соединений увеличивается в результате наклепа на 30—60%, долговечность в 3—5 раз.

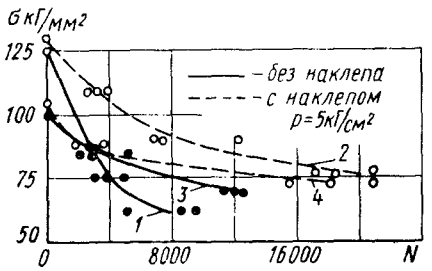


Рис. 13. Влияние наклепа пневмомолотком на повторно-статическую прочность при растяжении, термообработка на $\sigma_в = 120$ *кГ/мм²*: *1* и *2* — после сварки; *3* и *4* — до сварки

Обработку сварных соединений следует производить пневмомолотком при давлении воздуха 3—5 *кГ/см²*. Дробеструйный наклеп следует осуществлять на дробеструйной установке дробью диаметром 0,8—1 *мм* (угол падения дроби 45—90°; расстояние от места вылета дроби до обрабатываемой поверхности 350 *мм*). Наибольшее повышение долговечности сварных соединений наблюдается при скорости дроби 55 *м/сек* и продолжительность обработки 2—4 *мин*. При излишне большой продолжительности дробеструйного наклепа (10 *мин* и выше) долговечность ниже исходной.

Благоприятное влияние наклепа на сопротивляемость сварных соединений действию повторно-переменных нагрузок обусловлено как непосредственным

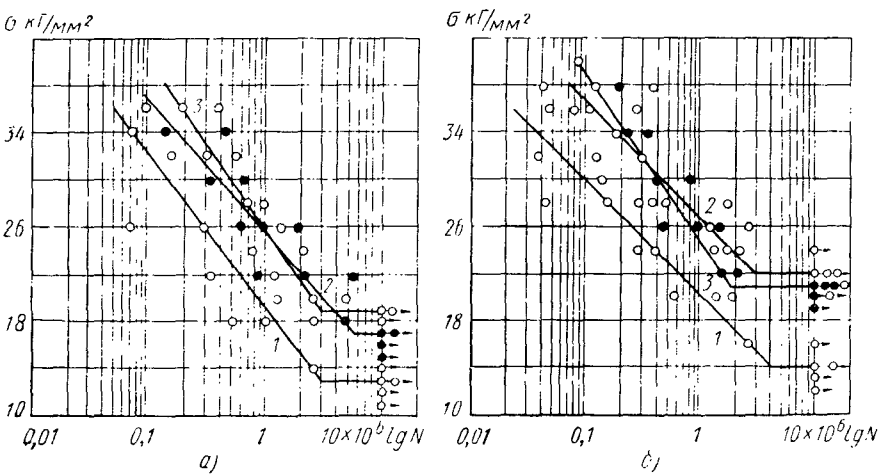


Рис. 14. Влияние наклепа на вибрационную прочность тавровых сварных соединений стали 30ХГСА: *а* — термообработка до сварки на $\sigma_в = 120$ *кГ/мм²*; *б* — термообработка после сварки на $\sigma_в = 120$ *кГ/мм²*; *1* — без наклепа; *2* — наклеп дробью; *3* — наклеп пневмомолотком

упрочнением поверхностного слоя металла при пластической деформации, так и созданием в этом слое внутренних сжимающих напряжений первого рода, понижающих чувствительность сварного соединения к различного рода поверхностным дефектам и уменьшающих вредное влияние внутренних растягивающих напряжений. Кроме того, повышению сопротивляемости сварных соединений действию повторно переменных нагрузок способствует улучшение состояния

поверхности при наклепе за счет создания плавных переходов от шва к основному металлу и расклепывания поверхностных дефектов. В результате наклепа тонкая кристаллическая структура и механические свойства поверхностных слоев сварного соединения становятся более однородными.

ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ

Среднеуглеродистые стали. Удовлетворительное соединение можно получить всеми видами сварки, за исключением газовой. После сварки необходимо производить отпуск при 650° С; изделия сложной конфигурации и с толщиной стенок более 15 *мм* сваривают с предварительным подогревом до 200° С; газовую сварку выполняют при положительных температурах.

Марганцовистые стали. При изготовлении конструкций из сталей марок 10Г2А и 12Г2А применяют сварку: газовую, атомноводородную, ручную дуговую, сварку под флюсом и в среде углекислого газа. Используются стали толщиной до 4 *мм*. Конструкции могут изготовляться с последующей термической обработкой после сварки или свариваться из нормализованных элементов.

Низколегированные стали средней прочности и высокопрочные. При изготовлении сварных деталей и конструкций из низколегированных сталей с пределом прочности 100 *кГ/мм*² и более применяют следующие виды термической обработки: 1) предварительную деталей до сварки; 2) промежуточную изделия; 3) окончательную изделия.

Предварительная термическая обработка имеет целью подготовить материал, поступающий после штамповки, гибки, профилирования для последующей сварки, или (в случае изготовления изделия из предварительно термически обработанных элементов) проведение упрочняющей термической обработки. В качестве подготовительной термической обработки применяются: а) изотермический отжиг после гибки, штамповки и т. п. для снятия остаточных внутренних напряжений; б) закалку и отпуск на соответствующий предел прочности.

Заготовки и элементы, не требующие резкой гибки и глубокой вытяжки, поступают на сварку в состоянии поставки.

Промежуточная термическая обработка предназначена для устранения повышенной твердости, возникшей в результате закалки переходной зоны и металла шва для того, чтобы облегчить выполнение последующей правки и снятия наклепа в заготовке после холодной деформации. Применяют отпуск при 650—680° С с охлаждением в горячей воде или на воздухе, а при необходимости значительной правки — изотермический отжиг, наиболее полно снимающий внутренние напряжения и вызывающий полную перекристаллизацию металла сварного соединения.

Окончательная термическая обработка имеет целью придать деталям требуемые высокие механические свойства и улучшить структуру сварного соединения.

Низколегированные стали 25ХГСА и 30ХГСА свариваются всеми видами сварки. Сталь 30ХГСА обладает повышенной склонностью к образованию трещин при газовой и атомноводородной сварке. Для снятия внутренних напряжений после сварки применяют отпуск. Конструкции, термически обрабатываемые после сварки, в случае длительного разрыва между сваркой и термической обработкой подвергают отпуску при 650° С. При большом количестве швов на деталях из указанных сталей, создающих жесткую систему (большое количество ребер жесткости и др.) рекомендуется производить промежуточный высокий отпуск деталей после сварки определенного количества 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, которая должна поддерживаться в течение всего процесса сварки. В особо сложных случаях подогрев может быть применен и для сталей 25ХГСА, а также сталей 12Х2НВФА (ЭИ712) и 23Х2НВФА (ЭИ659). Он может быть как общим, так и местным, но обязательно равномерным по всему периметру сварки и близлежащих зон на ширине не менее 100 *мм* по обе стороны от шва.

Сварные швы, выполненные на стали 30ХГСА с применением присадки, подвергавшейся электрошлаковому переплаву, по сравнению со швами, выполненными с присадкой, выплавленной в открытой индукционной печи, имеют высокие показатели по прочности, менее склонны к хрупкому разрушению и отличаются высокой стабильностью механических свойств.

Сталь 12Х2НВФА хорошо сваривается ручной дуговой, автоматической под флюсом, аргоно-дуговой (ручной и автоматической) и контактной сваркой; удовлетворительно — атомноводородной и газовой сваркой. Отпуск после сварки не требуется.

Сталь 23Х2НВФА (ЭИ659) хорошо сваривается контактной сваркой, удовлетворительно — ручной дуговой, автоматической под флюсом, аргоно-дуговой как ручной, так и автоматической. После сварки детали и узлы необходимо подвергать отпуску при 500° С. Отпуск деталей сложной конфигурации должен производиться немедленно после сварки.

Высокопрочная сталь 30ХГСНА сваривается ручной дуговой, автоматической под флюсом, атомноводородной и аргонодуговой сваркой. Газовую и контактную сварку не применяют. Атомноводородную и аргоно-дуговую сварку используют только при условии термической обработки сварного соединения и толщине свариваемых элементов до 6 *мм*, а также для выполнения первого слоя при многослойной сварке деталей большой толщины. Сталь 30ХГСНА обладает способностью сильно закаливаться и, следовательно, склонна к образованию холодных трещин в сварных соединениях. Чтобы избежать образования трещин, 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. Сварные швы можно предохранять при остывании также путем применения подогревателей или засыпкой их теплым песком. Сложные конструкции с замкнутыми швами, вызывающими появление больших внутренних напряжений, сваривают в подогретом состоянии при 200—300° С. Подогрев деталей может быть общим или местным. Детали простой формы, а также детали, не имеющие швов с жесткими контурами, можно сваривать без подогрева. Сварку конструкций, изготовляемых из закаленных элементов, производят с подогревом до 200—250° С. После сварки конструкции подвергают отпуску при 200—250° С с выдержкой в течение 3 *ч*. Отпуск нужно производить не позднее чем через 1 *ч* после сварки.

Высокопрочные стали 30Х2ГСНВМ (ВЛ-1Д), 42Х2ГСНМА (ВКС-1) и типа КВК сваривают в среде нейтральных газов (аргона или гелия). После сварки конструкции подвергают термической обработке (закалке с отпуском). В случае повышенной склонности к образованию холодных трещин отдельных партий металла рекомендуется подогрев деталей перед сваркой до 200—250° С. Простые детали можно сваривать без подогрева. После сварки, не допуская их охлаждения ниже 200° С, следует произвести отпуск т. в. ч. или в печи при 650° С с последующим охлаждением на воздухе. Если невозможно провести термическую обработку конструкции, состоящей из нескольких узлов, сваренных между собой, рекомендуется применение переходников из стали 30Х2ГСНВМ (ВЛ-1Д), приварку которых к узлам и деталям из стали 42Х2ГСНМА (ВКС-1) производят с последующей термической обработкой, а сварку их между собой осуществляют в термообработанном состоянии. Допустима сварка в окончательно упрочненном состоянии только кольцевых швов при утолщенных кромках в местах сварки.

Сварные конструкции, изготовленные из термически обработанных элементов, подвергают местному отпуску индукционным нагревом на $\sigma_в$ 100 ÷ 130 *кГ/мм*². Ширина зоны полного нагрева сварного шва и околошовной зоны при отпуске должна быть выбрана с расчетом перекрытия сварного шва не менее 3 *мм* с каждой стороны. После отпуска т. в. ч. температура нагрева тонкой части конструкции не должна превышать 300° С. Отпуск т. в. ч. должен производиться не позднее чем через 15 *мин* после окончания сварки.

Сталь 30Х2ГСНВМ (ВЛ1-Д) можно сваривать со сталями 42Х2ГСНМА, 30ХГСНА и др. Условия при этом должны быть: в случае сварки со сталью 42Х2ГСНМА такими же, как для стали 42Х2ГСНМА, а при сварке с другими сталями такими же, как для стали 30Х2ГСНМВ.

Сталь 42Х2ГСНМ (ВКС-1) можно сваривать со сталями 30Х2ГСНВМ (ВЛ1-Д), 30ХГСНА и 12Х2НВФА (ЭИ712). Условия сварки при этом должны быть такими же, как при сварке стали 42Х2ГСНМ (ВКС-1).

Стали типа КВК могут свариваться между собой и с другими конструкционными сталями (12Х2НВФА, 30ХГСА, 25ХГСА и др.). Условия сварки при этом должны быть такими же, как при сварке сталей типа КВК.

ГАЗОВАЯ, АТОМНОВОДОРОДНАЯ И АРГОНО-ДУГОВАЯ СВАРКА

Марки присадочной проволоки и механические свойства сварных соединений и швов приведены в табл. 6.

ДУГОВАЯ СВАРКА ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Для дуговой сварки конструкционных среднеуглеродистых и низколегированных сталей средней прочности и высокопрочных применяют электроды согласно табл. 7.

Для сварки материала толщиной более 1,5 *мм* рекомендуются электроды ВИ10-6 (Св-18ХМА) и НИАТ-3М. При сварке материала толщиной до 2 *мм* применяют электроды с тонким стабилизирующим покрытием ВИ9-6. Эти электроды независимо от толщины свариваемого материала используют 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 применением заливки, комбинированного способа сварки, наклепа и т. п. В конструкциях, подвергаемых термической обработке после сварки, все места концентрации напряжений сваривают с применением присадочной проволоки Св-18ХМА. В случае изготовления конструкций из термически обработанных элементов для заделки мест концентрации напряжений в концах врезных соединений также применяют присадочную проволоку Св-18ХМА; для заделки концов неврезных соединений (в трубчатых соединениях, приставных косынках и накладках) рекомендуются присадочные материалы ЭИ334, ХН78Т (ЭИ435) или Св-10Х16Н25М6. Сварные соединения, выполненные с присадкой из сплавов на никелевой основе, обладают высокими пластическими свойствами и малой чувствительностью к концентраторам напряжения, что имеет большое значение для конструкций, работающих при динамических и ударных нагрузках.

При комбинированной сварке применение для подварки мест концентрации напряжений присадочного материала из сплава ЭИ334 повышает (по сравнению с проволокой Св-18ХМА) прочность соединений при повторных статических нагрузках и не снижает их пределов прочности и выносливости (рис. 15 и табл. 8).

6. Присадочная проволока для газовой и атомноводородной сварки среднеуглеродистых и низколегированных сталей и механические свойства сварных соединений и швов

Марка свариваемой стали	Термическая обработка	Присадочная проволока		$\sigma_в$ в кГ/мм²	$a_н$ в кГм/см²
		Марка	ГОСТ или ТУ		
45	Без термической обработки или закалка и отпуск после сварки	Св-08; Св-08А, Св-08ГА; Св-10ГА; Св-08ГС; Св-12ГС	ГОСТ 2246—60*	0,8 $\sigma_в$ основного металла	—
10Г2А; 15Г2А	Без термической обработки или с нормализацией до или после сварки	Св-08А; Св-08ГА; Св-18ХМА *	ГОСТ 2246—60*	0,8 $\sigma_в$ основного металла	6
25ХГСА, 30ХГСА	Закалка и отпуск после сварки на $\sigma_в$: ≥ 90 кГ/мм²	Св-08А; Св-18ХМА *	ГОСТ 2246—60*	0,8 $\sigma_в$ основного металла	6 газовая, 8 атомноводородная
	~ ≥ 90 кГ/мм²	Св-18ХМА			4 газовая, 7 атомноводородная
	Закалка и отпуск на любой предел прочности до сварки (сварка в термообработанном состоянии)	ЭИ334; ЭИ435	ЧМТУ 1ЦНИИЧМ 514—61	60	8
		Св-10Х16Н25М6	ГОСТ 2246—60*		
12Х2НВФА (ЭИ712) 23Х2НВФА (ЭИ659)	Без последующей термической обработки (сварка в закаленном состоянии)	Св-18ХМА	ГОСТ 2246—60*	90 105	6 4
То же		Св-10Х16Н25М6		60	10
12Х2НВФА (ЭИ712) 23Х2НВФА (ЭИ659)	Закалка и отпуск после сварки для стали ЭИ712 на $\sigma_в$ ≥ 100 кГ/мм², для стали ЭИ659 на $\sigma_в$ ≥ 115 кГ/мм²	Св-18ХМА	ГОСТ 2246—60*	0,95 $\sigma_в$ основного металла	6 4
30ХГСНА**	Закалка и отпуск после сварки на $\sigma_в$ = 160 — 180 кГ/мм²	Св-18ХМА	ГОСТ 2246—60*	0,9 $\sigma_в$ основного металла	5

* Присадочную проволоку Св-18ХМА рекомендуется применять в целях повышения прочности сварных соединений при статических, вибрационных и повторных статических нагрузках.

** Газовая сварка не применяется. Атомноводородная и аргоно-дуговая сварка применяется только при условии термической обработки сварного соединения после сварки при толщине свариваемых элементов до 6 мм, а также для выполнения первого слоя при многослойной сварке деталей больших толщин.

7. Электроды для дуговой сварки конструкционных среднеуглеродистых и низколегированных сталей средней прочности и высокопрочных и механические свойства сварных соединений и швов

Марка свариваемой стали	Термическая обработка	Марка		$\sigma_в$ в $кГ/мм^2$	$a_н$ в $кГм/см^2$
		покрытия	проволоки		
45	Без термической обработки или закалка и отпуск после сварки	ВИ9-6; ВИ10-6; НИАТ-3М; УОНИ-13/55	Св-08А	0.9 $\sigma_в$ основного металла	—
10Г2А; 12Г2А	Без термической обработки или с последующей нормализацией	ВИ9-6; ВИ10-6 НИАТ-3М	Св-08А; Св-18ХМА* Св-08А	0.9 $\sigma_в$ основного металла	3/6*****
25ХГСА; 30ХГСА	Закалка и отпуск после сварки на $\sigma_в \geq 90$ $кГ/мм^2$				2/6*****
25ХГСА; 30ХГСА при толщине в мм: до 10 10—20 св. 20	То же $\sigma_в \geq 90$ $кГ/мм^2$	ВИ9-6; ВИ10-6 НИАТ-3М	Св-18ХМА Св-08А	0,9 $\sigma_в$ основного металла 90 80	1,5/5*****
25ХГСА; 30ХГСА при толщине в мм: до 10 10—20 св. 20	Без последующей термической обработки с любой прочностью материала до сварки (сварка в термообработанном состоянии)	ВИ12-6** НИАТ-5	ЭИ334; ЭИ435 Св-10Х16Н-25М6	60 55 50	10

Продолжение табл. 7

Марка свариваемой стали	Термическая обработка	Марка		$\sigma_в$ в $кГ/мм^2$	$a_н$ в $кГм/см^2$
		покрытия	проволоки		
12Х2НВФА (ЭИ712) 23Х2НВФА (ЭИ659)	Без последующей термической обработки (сварка в закаленном состоянии)	ВИ10-6; НИАТ-3М УОНИ-13/85 НИАТ-5***	Св-18ХМА; Св-08А Св-10Х16Н-25М6	ЭИ712 ЭИ659 95 85 115 60 60	ЭИ712 ЭИ659 6 4 10 10
12Х2НВФА (ЭИ712) 23Х2НВФА (ЭИ659)	Закалка и отпуск после сварки на $\sigma_в \geqslant 100$ $кГ/мм^2$ » $\sigma_в \geqslant 115$ »	ВИ10-6 НИАТ-3М УОНИ-13/85	Св-18ХМА Св-08А —	0.95 $\sigma_в$ основного металла	6 4
30ХГСНА при толщине в мм: от 4 до 10 » 10 » 15 » 15 » 20 св. 20	Закалка и отпуск после сварки на $\sigma_в = 160 \div 180$ $кГ/мм^2$	ВИ10-6 НИАТ-3М	Св-18ХМА Св-08А	120 100 90 80	5
от 4 до 15 » 15 » 20 св. 20	Без последующей термической обработки (сварка в закаленном состоянии)	ВИ12-6** НИАТ-5	ЭИ334 ЭИ435 Св-04Х19Н-11М3**** Св-10Х16Н-25М6	60 55 50	10

* Целесообразно применять в целях повышения прочности соединений при статических, вибрационных и повторных статических нагрузках.

** Возможно также использование покрытий УОНИ-13 (НЖ), ЦЛ-8; НИАТ-1 и др., предназначенных для электродов аустенитного класса.

*** Для деталей и узлов, работающих в особо тяжелых условиях при динамических (ударных), вибрационных и повторных статических нагрузках.

**** Только для сварки по слоям, наплавленным присадками ЭИ334 и ЭИ435.

***** В числителе для швов, выполненных тонкообмазанными электродами, в знаменателе — толстообмазанными (качественными) электродами.

Присадочные материалы Св-06Х19Н9Т, Св-13Х25Н18, Св-08Х20Н10Г6 и другие для сварки низколегированных сталей не применяются, так как сварные соединения в зоне перемешивания с основным материалом приобретают хрупкость из-за недостаточного запаса аустенитности.

8. Предел прочности и выносливости типовых трубчатых узлов (пояс, раскос и стойка) при комбинированной сварке

Электроды и присадочные материалы при сварке [1]		Термическая обработка ($\sigma_в = 120 \pm 10$ *кГ/мм²*)	$\sigma_в$ в *кГ/мм²*	σ_1 в *кГ/мм²*
дуговой	газовой			
ВИ9-6 (Св-18ХМА)	ЭИ334	До сварки После сварки	95 110	7,5 8,0
ВИ9-6 (Св-18ХМА)	Св-18ХМА	До сварки После сварки	90 105	7,0 7,5

[1] Основные швы выполнены дуговой сваркой, под раскосом шов выполнен газовой сваркой.

Детали из стали 30ХГСНА с жесткими замкнутыми швами и толщиной свариваемых элементов более 15 *мм* в случае образования трещин в швах при применении электродов со стержнями из сплавов ЭИ334 или ЭИ435 сваривают по следующей технологии: перед сваркой на кромки сварного соединения на-

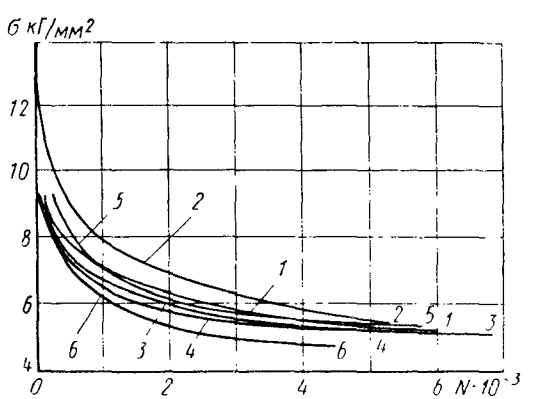


Рис. 15. Прочность при повторно-статических нагрузках типовых трубчатых узлов. Цикл симметричный: *1* — комбинированная сварка [ручная дуговая — электроды марки ВИ9-6 (Св-18ХМА), газовая — проволока марки ЭИ334; закаленные элементы до сварки]; *2* — комбинированная сварка [ручная дуговая — электроды марки ВИ9-6 (Св-18ХМА), газовая — проволока марки ЭИ334, термическая обработка после сварки]; *3* — комбинированная сварка [ручная дуговая — электроды марки ВИ9-6 (Св-18ХМА); газовая — проволока марки ЭИ334, закаленные элементы + отпуск после сварки при 240 ± ± 10° С с выдержкой в течение 1—1,5 ч]; *4* — комбинированная сварка [ручная дуговая — электроды марки ВИ9-6 (Св-18ХМА); газовая — проволока марки Св-18ХМА; закаленные элементы]; *5* — комбинированная сварка [ручная дуговая — электроды марки ВИ9-6 (Св-18ХМА); газовая — проволока марки Св-18ХМА, термическая обработка после сварки]; *6* — ручная дуговая сварка — электроды марки ВИ10-6 (Св-18ХМА); закаленные элементы

плавляют слои толщиной 2—3 *мм* электродами ВИ12-6 (ЭИ334) или ВИ12-6 (ЭИ435) (рис 16, *а*), сварка по наплавленным слоям (рис. 16, *б*) производится электродами ВИ12-6 (Св-04Х19Н11М3). Швы, выполненные электродами со стержнями из сплавов на никелевой основе ЭИ334, ЭИ435 и аустенитной стали Св-10Х16Н25М6, имеют предел прочности 50—60 *кГ/мм²*. Поэтому при выпол-

нении швов, воспринимающих значительные нагрузки, необходимо увеличивать периметр сварных швов при работе на срез или толщину деталей в месте расположения сварных соединений.

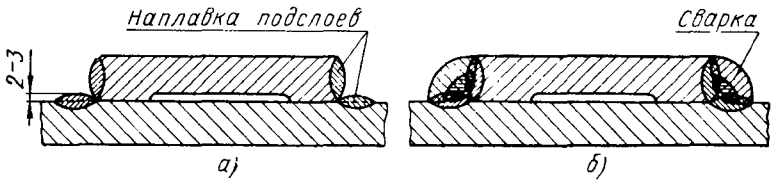


Рис. 16. Сварка по наплавленным слоям: *а* — первая операция; *б* — вторая операция

Сварку низколегированных сталей производят в помещении, где температура должна быть не ниже +15° С, при этом недопустимы сквозняки. При дуговой сварке применяют постоянный ток.

Режимы сварки приведены в табл. 9.

9. Режимы дуговой сварки сталей марок 10Г2А, 12Г2А, 25ХГСА, 30ХГСА, ЭИ712, ЭИ659 и 30ХГСНА*

Толщина в *мм*	Встык		Втавр		Внахлестку	
	Ток в *а*	Диаметр электрода в *мм*	Ток в *а*	Диаметр электрода в *мм*	Ток в *а*	Диаметр электрода в *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 из этих сталей аустенитными электродами ток уменьшают на 25%.

* Для толщин ≥ 4 *мм*.

СВАРКА ПОД ФЛЮСОМ

Электродную проволоку и флюс выбирают согласно табл. 10.

Автоматическая сварка под флюсом рекомендуется для толщины свыше 4 *мм* для прямолинейных и кольцевых (диаметром 80 *мм* и выше) швов. Тип соединения — встык с чашеобразной разделкой на подкладке. Для сварки сталей в исходном состоянии применяют подкладки из стали 20, для сварки стыковых соединений из сталей 30ХГСНА и 30ХГСА в предварительно закаленном состоянии — подкладки из стали 30ХГСА. Замковые соединения и подкладные кольца для стали 30ХГСНА не рекомендуются, так как они снижают надежность изделия в эксплуатации. Вместо применения подкладных колец первые слои целесообразно выполнять аргоно-дуговой сваркой.

Подкладки предотвращают протекание флюса и расплавленного металла и позволяют избежать прожоги и проплавы. На свариваемых кромках нельзя

10. Электродная проволока и флюс для сварки среднеуглеродистых и низколегированных сталей средней и высокой прочности и механические свойства сварных соединений и швов

Марка свариваемой стали	Термическая обработка	Электродная проволока		Марка флюса	$\sigma_в$ в $кГ/мм^2$	$a_н$ в $кГм/см^2$
		Марка	ГОСТ или ТУ		не менее	
45	Без термической обработки или закалка и отпуск после сварки	Св-08А	ГОСТ 2246—60*	ОСЦ-45; АН-348А; АЦ-1; АН-3; ФЦ-6	0.9 $\sigma_в$ основного металла	—
10Г2А; 12Г2А	Без термической обработки или с последующей нормализацией	Св-08А Св-08ГА Св-18ХМА*	ГОСТ 2246—60*	АН-15 АН-348А	0.9 $\sigma_в$ основного металла	6
25ХГСА; 30ХГСА	Закалка и отпуск для стали 25ХГСА на $\sigma_в = 110 \pm 10$ $кГ/мм^2$; для стали 30ХГСА на $\sigma_в = 120 \pm 10$ $кГ/мм^2$ после сварки	Св-18ХМА	ГОСТ 2246—60*	АН-15 АН-348А АН-3	90	5 4 3,5
25ХГСА; 30ХГСА	То же до сварки	Св-10Х16-Н25М6	ГОСТ 2246—60*	АН-15	60	10

Продолжение табл. 10

Марка свариваемой стали	Термическая обработка	Электродная проволока		Марка флюса	$\sigma_в$ в $кГ/мм^2$	$a_н$ в $кГм/см^2$
		Марка	ГОСТ или ТУ		не менее	
12Х2НВФА (ЭИ712) 23Х2НВФА (ЭИ659)	Без последующей термической обработки (сварка в закаленном состоянии). Закалка и отпуск для стали ЭИ712 $\sigma_в \geq 100$ $кГ/мм^2$; для стали ЭИ659 $\sigma_в \geq 115$ $кГ/мм^2$ после сварки	Св-18ХМА	ГОСТ 2246—60*	АН-348А	0,95 $\sigma_в$ основного металла	6 4
30ХГСНА	Закалка и отпуск на $\sigma_в = 160 \div 180$ $кГ/мм^2$ после сварки	0Х4МА	ЧМТУ ЦНИИЧМ 1033—63	АН-15	120	4
		Св-18ХМА	ГОСТ 2246—60*	АН-15	90	6
		Св-18ХМА	ГОСТ 2246—60*	АН-1К***	90	4
30ХГСНА**	То же до сварки	Св-10Х16-Н25М6****	ГОСТ 2246—60*	АН-15	60	10

* Электродную проволоку марки Св-18ХМА целесообразно применять в целях повышения прочности сварных соединений при статических, вибрационных и повторных статических нагрузках.

** Цилиндры диаметром 80—400 *мм* и детали с прямолинейными и кольцевыми швами.

*** Допускается использование флюса АН-1К в сочетании с электродной проволокой Св-18ХМА. Флюс АН-1К — механическая смесь двух флюсов: 80% флюса АН-1 и 20% керамической добавки состава — 38,9% $CaCO_3$; 20% CaF_2; 20% TiO_2; 8% FeTi; 4,5% FeSi; 2,5% FeCr; 1,7% FeMn; 1% никеля электролитического; 0,3% графита электродного и жидкого стекла (плотностью 1,25—1,28 $г/см^3$) в количестве 200—220 $см^3$ на 1 *кг* сухой смеси.

**** В случае отсутствия трещин в сварных соединениях при сварке предварительно закаленных элементов из стали 30ХГСНА разрешается применять автоматическую сварку проволокой Св-10Х16-Н25М6 под флюсом АН-15 без подогрева.

допускать никаких следов загрязнения. Очистку следует производить обдувкой металлической дробью и обезжириванием. Режимы сварки под флюсом приведены в табл. 11—13.

11. Режим автоматической сварки под флюсом АН-15 кольцевых швов стали 30ХГСНА; 30ХГСА в исходном состоянии (термически не обработанных)

Толщина свариваемой стали в *мм*	Диаметр электрода в *мм*	Ток в *а*	Напряжение дуги в *в*	Скорость сварки в *м/ч*
4—25	3	250—300	25—30	1-й слой: 28—30; последующие 20—22
8—25	3	260—300	28—30	
12—25	3	280—320	26—30	1-й слой 28—30; последующие 18—22

Примечание. Смещение электрода 15—30 *мм* в зависимости от свариваемой детали.

12. Режимы автоматической сварки под флюсом прямолинейных швов на сталей 30ХГСНА и 30ХГСА в исходном состоянии (термически не обработанных)

Толщина свариваемой стали в *мм*	Диаметр электрода в *мм*	Ток в *а*	Напряжение дуги в *в*	Скорость сварки в *м/ч*
4—8	3	280—320	26—32	18—25
8—16	3	300—360	26—32	14—25
16—25	3	300—450	26—32	14—25

13. Режимы автоматической сварки под флюсом предварительно закаленных элементов сталей 30ХГСНА и 30ХГСА (флюс АН-15; электродная проволока Св-10Х16Н25М6)

Шов	Толщина стали в *мм*	Диаметр электрода в *мм*	Ток в *а*	Напряжение дуги в *в*	Скорость сварки в *м/ч*	Количество слоев
Кольцевой	4—14	2	150—160	22—24	15—20	2—8
Прямолинейный . .	14	2	180	24	20	6

Сварка под флюсом АН-1К, АН-3, АН-348А производится на постоянном или переменном токе, под флюсом АН-15 — на постоянном токе обратной полярности. При флюсах АН-3 и АН-1К напряжение на дуге должно быть 24—30 *в*, а при флюсах АН-348А и АН-15 — в пределах 28—34 *в*.

Для увеличения сопротивляемости сварных соединений из низколегированных сталей горячим трещинам, а также повышения пластичности металла шва применяют методы сварки и технологические приемы, способствующие рафинированию металла шва, а также оптимальные системы легирования. С этой целью

используют флюсы, позволяющие весьма энергично рафинировать металл шва от кислорода и удалять серу и фосфор. При автоматической сварке высокопрочной стали 30ХГСНА по мере снижения химической активности флюса уменьшается содержание кислорода в металле шва и соответственно растет ударная вязкость. Безокислительный керамический флюс типа АВ-5 обеспечивает высокие механические свойства при низких (до —70° С) температурах (табл. 14).

14. Влияние кислорода в сварном шве на ударную вязкость сварных соединений при автоматической сварке под флюсами АН-348А и АВ-5

Марка флюса	Ударная вязкость * в *кГм/см²* при температуре в °С		Содержание кислорода в %
	+20	—70	
АН-348А	$\frac{3.8—5.0}{4.6}$	$\frac{2.3—3.2}{2.2}$	0,103
АВ-5	$\frac{8.6—12.8}{10.0}$	$\frac{4.4—7.1}{5.6}$	0,0166

* В знаменателе — среднее значение.

Содержание серы в низколегированных сталях более 0,04% вызывает образование горячих трещин при сварке и резко снижает конструктивную прочность сварных изделий. В связи с этим для улучшения свойств сталей и металла шва содержание серы стремятся свести к допустимому минимуму, ограничивая содержание ее в основном металле и сварочных материалах.

Как известно, фосфор ухудшает механические свойства сталей, вызывая их хладноломкость. Уменьшения количества фосфора в металле шва добиваются так же, как и серы, ограничением его содержания в основном металле и сварочных материалах. В кислых шлаках удаление фосфора из металла в шлак затрудняется. Поэтому применение основных флюсов более целесообразно, так как они способствуют обессериванию и обесфосфориванию металла шва.

Широко используется при сварке стали 30ХГСНА низкокремнистый флюс АН-15; еще большими преимуществами обладает низкокремнистый безмарганцовистый флюс марки АН-15М. При сварке под этим флюсом удается заварить стыки любого размера без перерыва. Как известно, для предотвращения стекания флюса и для хорошего формирования шва дуга должна быть короткой. Этим условиям флюс АН-15М отвечает в большей степени, чем флюс АН-15. Флюс АН-15М по сравнению с флюсом АН-15 повышает предел прочности сварных швов на 9%, ударную вязкость на 30%.

Кислые флюсы типа АН-348А и АН-3 для сварки низколегированных высокопрочных сталей применять запрещается из-за высокого содержания окислов кремния.

СВАРКА В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

Сварка может быть осуществлена неплавящимся (вольфрамовым) и плавящимся электродами. В качестве защитной среды применяют чистый аргон марок Б и В по ГОСТу 10157—62 и технический гелий первого сорта по ВТУ Главгаза № 04-23-59; при сварке плавящимся электродом используют также углекислый газ (ГОСТ 8050—64). В качестве неплавящихся электродов для ручной и автоматической сварки на постоянном токе применяют вольфрамовые прутки по ТУ ВМ2 529-57, лантанированные вольфрамовые прутки по ВТУ ВЛ № 24-5-62, а также прутки из тарированного вольфрама по нормали НИО-021-612 и итри-

рованного вольфрама, при сварке на переменном токе — чистые вольфрамовые прутки по ТУ ВМ2-529-57.

При выборе присадочного материала (электродной проволоки) для дуговой сварки в среде защитных газов следует руководствоваться табл. 15, в которой также указаны механические свойства сварных соединений и швов.

Дуговая сварка неплавящимся электродом может осуществляться с непрерывной и импульсной подачей энергии — сварка импульсной дугой. Предпочтение следует отдавать автоматической и полуавтоматической сварке, обеспечивающей наилучшее качество швов и высокую производительность процесса. Неплавящимся электродом рекомендуется сваривать изделия из материала толщиной не более 4—5 *мм*; сварку плавящимся электродом можно применять при изготовлении изделий из материалов толщиной 1,0 *мм* и выше. Для материала толщиной до 2 *мм* рекомендуется автоматическая аргоно-дуговая сварка неплавящимся электродом без присадки или с присадочной проволокой; целесообразна сварка импульсной дугой. При большей толщине сварка производится с применением присадки. Материал толщиной 3—5 *мм* рекомендуется сваривать по методу Института электросварки им. Е. О. Патона: первый слой выполняют без присадки с полным проваром кромок стыка, второй — с поперечным перемещением электрода и механической подачей присадочной проволоки. При наложении второго слоя глубина проплавления должна составлять 60—70% толщины основного материала (глубина проплавления более 70% не допускается). Сварка должна производиться короткой дугой, зазор между электродом и изделием должен быть 0,5—1,0 *мм*. Для осуществления поперечных перемещений электрода рекомендуется применять механизм А-1017, разработанный в Институте электросварки им. Е. О. Патона, можно также использовать механизмы других конструкций. Указанный метод сварки применяется с целью уменьшения перегрева сварного соединения, получения благоприятной кристаллизации металла шва, уменьшения коробления в процессе сварки и тем самым повышения механических свойств сварного соединения. По сравнению со сваркой без перемещения электрода особенно существенно возрастают показатели пластичности, вязкости металла шва, сопротивление развитию трещины и конструктивная прочность сварных соединений. При этом металл шва не имеет столбчатой направленности, не обнаруживается перегрев переходных зон, шов имеет более благоприятную форму с плавными переходами к основному металлу.

Для улучшения формирования сварного шва и увеличения проникающей способности применяют смесь газов — аргон и гелий (до 25%); чтобы избежать пористости в сварном шве, а также улучшить устойчивость горения дуги при сварке на переменном токе, дополнительно вводят небольшое количество кислорода (до 1%).

Ручную и автоматическую сварку неплавящимся электродом производят на постоянном (прямой полярности) или переменном токе. Вольфрамовый электрод располагают к изделию под углом 60—80° при ручной сварке и 80—90° при автоматической. Угол между вольфрамовым электродом и присадочной проволокой (прутком) в процессе сварки рекомендуется сохранять 90°. Длина выступающего из сопла конца вольфрамового электрода должна составлять 5—12 *мм*. Конец вольфрамового электрода при сварке постоянным током затачивают на конус с углом 30—50°. Заточку производят по мере оплавления. При необходимости сварки на весу рекомендуется применять аргоно-дуговую сварку переменным током промышленной или повышенной частоты. Сварка неплавящимся электродом производится без скоса кромок в один проход на переменном токе промышленной частоты для толщин 2,5—4 *мм*, а на токе повышенной частоты — 1—2,5 *мм*.

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 может осуществляться без присадки, а при сварке с разделкой — как без присадки, так и с присадкой (в зависимости от формирования проплава). Если проплав имеет вогнутую

15. Присадочный материал для дуговой сварки в среде защитных газов конструкцион соединений

Марка свариваемой стали	Термическая обработка	Присадочный материал (электродная	
		в среде инертных газов	
		Марка	ГОСТ или ТУ
45; 10Г2А; 12Г2А;	Без термической обработки, а также закалка и отпуск (для стали 45), нормализация (для 10Г2А, 12Г2А) до и после сварки	—	—
25ХГСА; 30ХГСА	Закалка и отпуск после сварки	Св-08А; Св-18ХМА **	ГОСТ 2246—60*
12Х2НВФА (ЭИ712)	Без последующей термической обработки (сварка в закаленном состоянии)	Св-18ХМА;	ГОСТ 2246—60*
23Х2НВФА (ЭИ659)	Закалка и отпуск после сварки: для стали ЭИ712 на $\sigma_в \geq 100$ *кГ/мм²*; для стали ЭИ659 на $\sigma_в \geq 115$ *кГ/мм²*	Св-10Х16Н25М6 ***	
	Закалка и отпуск после сварки на $\sigma_в$ в *кГ/мм²*	Св-20Х2ГСНВМ **** (Св-ВЛ-1Д);	ЧМТУ ЦНИИЧМ 582—61
30Х2ГСНВМ (ВЛ-1Д)	170 ± 10	Св-20ХСНВФА	ЧМТУ ЦНИИЧМ 612—61
42Х2ГСНМА (ВКС-1)	200 ± 10		
КВК-42	200 ÷ 15		
КВК-37	180 ÷ 190		
КВК-32	160 ÷ 180		
КВК-26	140 ÷ 160		

* Применять предпочтительней.

** Применяется для сварных соединений с $\sigma_в \geq 90$ *кГ/мм²*; для соединений с

*** Используется для сварки сталей без последующей термической обработки условиях при динамических (ударных), вибрационных и повторных статических наг

**** Допустима также сварка в окончательном упрочненном состоянии только для

ных среднеуглеродистых и низколегированных сталей и механические свойства сварных швов

проволока при сварке	Механические свойства		
в углекислом газе	$\sigma_в$ в $кГ/мм^2$	$a_н$ в $кГм/см^2$	α в *град*
Марка по ГОСТу 2246—60*	не менее		
Св-08ГС; Св-10Г2; Св-12ГС; Св-08Г2С	0,9 $\sigma_в$ основного металла	6	—
Св-18ХМА; Св-18ХГСА *; Св-10ГСМТ *	0,9 $\sigma_в$ основного металла	6 (при $\sigma_в$ основного металла $\leqslant$ 90 $кГ/мм^2$) 4,5 (при $\sigma_в$ основного металла $\geqslant$ 90 $кГ/мм^2$)	—
Св-10ГСМТ	0,95 $\sigma_в$ основного металла	6 (для ЭИ712); 4 (для ЭИ659)	—
—	60	10	
—	0,9 $\sigma_в$ основного металла	—	50
			30
			30
			35
			40
			45

$\sigma_в \leqslant 90$ $кГ/мм^2$ используется присадка Св-08А.
(сварка в закаленном состоянии) для деталей и узлов, работающих в особо тяжелых
рузках.
кольцевых швов при утолщенных кромках в местах сварки.

16. Режимы сварки неплавящимся электродом конструкционных сталей

Способ сварки	Толщина основного металла в *мм*	Сварка встык с присадкой в среде						Сварка встык без присадки в среде					
		аргона			гелия			аргона			гелия		
		Ток в *а*	Скорость сварки в *м/ч*	Расход газа в *л/мин*	Ток в *а*	Скорость сварки в *м/ч*	Расход газа в *л/мин*	Ток в *а*	Скорость сварки в *м/ч*	Расход газа в *л/мин*	Ток в *а*	Скорость сварки в *м/ч*	Расход газа в *л/мин*
Автоматическая	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	50—80	20—30	4,0	35—60	20—30	5,5
	1,5	80—120	15—30	5—6	60—80	20—30	6—8	60—90	20—30	5—6	40—65	20—30	6—8
	2,5	100—150	10—25	6—7	70—100	15—25	8—9	90—140	15—20	6—7	60—80	15—20	8—9
	4,0	160—200	До 10	7—8	110—170	До 10	9—10	140—200	8—10	7—8	80—140	8—10	9—10
Ручная	1,0	30—60	—	3,5—4	30—45	—	5—5,5	—	—	—	—	—	—
	1,5	45—70	—	4—5	40—55	—	5—7,0	—	—	—	—	—	—
	2,0	70—120	—	5—6	50—80	—	7—8,0	—	—	—	—	—	—
	3,0	110—150	—	6—7	75—100	—	8—9,0	—	—	—	—	—	—

Примечания: 1. Напряжение на дуге при сварке в аргоне 11—15 *в*; при сварке в гелии 16—22 *в*.

2. Длину дуги поддерживать 1—3 *мм*.

3. Скорость подачи присадочной проволоки выбирать в соответствии с заданным сечением сварного шва.

4. Диаметр присадочной проволоки выбирать в соответствии с толщиной основного металла.

17. Ориентировочные режимы сварки плавящимся электродом конструкционных сталей

Способ сварки	Подготовка кромок и вид соединения	Толщина основного металла в *мм*	Аргон + 5 ÷ 10% углекислого газа				Гелий				Диаметр электродной проволоки в *мм*
			Ток в *а*	Скорость сварки в *м/ч*	Число слоев	Расход газа в *л/мин*	Ток в *а*	Скорость сварки в *м/ч*	Число слоев	Расход газа в *л/мин*	
Автоматическая	Встык без разделки	0,5	40—60	50—70	1	6—8	—	—	—	—	—
		0,8	70—90	40—60		6—8	—	—	—	—	—
		1,0	90—110	35—55		6—8	—	—	—	—	—
		1,5	110—130	20—40		6—8	—	—	—	—	—
		2,5	190—270	20—40		6—8	140—200	20—40	1	8—11	1,6—2
		3,0	240—330	20—50		6—8	190—270	20—40	1	8—10	1,6—2
	Встык 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—360	15—30	1—2	11—14	2—2,5
		8	350—430	15—30	2	11—15	270—340	15—30	2	13—18	2—3
		10	360—460	15—30	2	12—17	290—340	15—30	2	15—20	2—3
Полуавтоматическая	Встык без разделки	1	35—55	—	1	4—6	—	—	—	—	0,5—0,7
		1,5	70—90			5—7	—	—	—	—	0,8—1,0
		2	110—130			6—8	—	—	—	—	1,0—1,2
		2,5	140—180			6—8	90—120	—	1	8—10	1,0—1,2
		3	160—200			6—8	100—180	—	1	8—10	1,0—1,6
	Встык с V-образной разделкой	4	180—300	—	1	7—9	120—200	—	1	9—11	1,0—1,6
		6	240—340		1—2	9—12	180—260	—	1—2	11—14	1,6—2,0
		8	300—320		2	11—15	200—300	—	2	13—18	1,6—2,0
		10	390—420		2	12—17	240—380	—	2	15—20	2,0
	Внахлестку	1	55—75	—	1	4—6	—	—	—	—	0,5—0,8
		1,5	80—100			5—7					0,8—1,0
		2,0	115—135			6—8					1,0—1,2
		3,0	165—200			6—8					1,0—1,6
		1,5—8,0	105—125			6—8					1,0—1,2
		2,0—8,0	115—135			6—8					1,0—1,6
	Втавр	1,0	40—60	—	1	4—6	—	—	—	—	0,5—0,8
		1,5	65—85			5—7					0,8—1,0
		2,0	100—120			6—8					1,0—1,2
		3,0	150—170			6—8					1,0—1,6

Примечание. Напряжение на дуге при сварке плавящимся электродом в аргоне с добавкой углекислого газа — 20 — 30 *в*, в гелии — 26—39 *в*.

18. Ориентировочные режимы автоматической сварки конструкционной стали в среде углекислого газа (при расходе газа 6—10 *л/мин*)

Тип соединения	Толщина основного металла в *мм*	Диаметр электродной проволоки в *мм*	Режим сварки		
			Ток в *а*	Напряжение дуги в *в*	Скорость сварки в *м/ч*
Встык	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	20—22	20—40
	5,0	2,0	280—340	26—28	15—30
	10,0	2,0	280—340	26—28	25—40
Внахлестку	1,0	0,6	45—65	18—20	25—45
	1,5	0,6	70—90	19—21	20—22
	3,0	1,0	100—120	19—21	15—20

Примечание. При толщине материала 10 *мм* сварка производится в два — три слоя.

19. Ориентировочные режимы полуавтоматической сварки плавящимся электродом в среде углекислого газа стали 30ХГСА

Тип соединения	Толщина основного металла в *мм*	Диаметр электродной проволоки в *мм*	Режим сварки		
			Ток в *а*	Напряжение дуги в *в*	Расход газа в *л/мин*
Встык	0,8	0,5—0,7	40—60	16,5—18,5	6—8
	1,0	0,5—0,7	45—55	18—19	6—8
	1,5	0,8—1,0	65—85	19—20	6—8
	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	8—10
	10,0	1,6—2,0	280—300	26—28	8—10
Внахлестку	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	7—9
Втавр	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	8—10

Примечание. При толщине материала 10 *мм* сварка производится в два слоя.

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. 16—19).

В процессе сварки обратная сторона сварного шва должна надежно защищаться от воздействия воздуха. Для этого в сварочном приспособлении применяют прокладки, которые изготовляют из нержавеющей стали для уменьшения скорости охлаждения соединения. Подкладки под свариваемым стыком имеют продольную канавку, которая в процессе сварки заполняется аргоном и защищает свариваемые кромки от окисления. 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. Для избежания перегрева сварного соединения и уменьшения его деформаций применяют импульснодуговую сварку. Сварка импульсной дугой вольфрамовым электродом выполняется на постоянном токе прямой полярности. «Дежурная дуга» также питается постоянным током прямой полярности. К основным параметрам режима сварки относятся величина тока импульса, длительность импульса $t_{имп}$, длительность паузы $t_{паузы}$, длина дуги и скорость сварки; $t_{имп} + t_{паузы}$ составляют цикл; $\frac{t_{паузы}}{t_{имп}}$ — жесткость режима. При равных погонных энергиях и скоростях сварки для тонколистового металла (0,3—0,8 *мм*) проплавляющая способность импульсной дуги выше, чем постоянно горящей. 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 как с присадочным материалом, так и без него не отличается от техники сварки постоянно горящей дугой вольфрамовым электродом. Ориентировочные режимы приведены в табл. 20.

20. Ориентировочные режимы сварки встык импульсной дугой низколегированных сталей средней прочности и высокопрочных

Толщина основного металла в *мм*	Диаметр вольфрамового электрода в *мм*	Ток в *а*	Время импульса в *сек*	Время паузы в *сек*
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

ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВАЯ СВАРКА

Сварку выполняют в герметичных камерах, в которых поддерживается либо глубокий вакуум (10^{-1}—10^{-6} *мм рт. ст.*), либо создается среда проточного инертного газа, что обеспечивает надежную защиту свариваемого материала. Прочность соединения при сварке вне вакуума такая же, как и при сварке в вакууме. Имеются вакуумные сварочные камеры диаметром 4 *м* и длиной 8 *м*. Время, необходимое для создания в камере соответствующего разрежения, составляет 15—20 *мин*.

Низколегированные высокопрочные стали различных марок при толщине до 25 *мм* можно сваривать электронным лучом за один проход без тщательной подготовки шва и без предварительного подогрева. При производстве сложных деталей с точными допусками применение электроннолучевой сварки целесообразно, так как после сварки отсутствует коробление. Этим способом можно сваривать стали различной толщины.

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 плотностью мощности порядка 10^3—10^6 *вт/см*^{2}; выходная мощность до 6 *квт*. Для деталей из предварительно закаленных элементов без последующей термообработки следует применять высоковольтные установки с ускоряющим напряжением 100—150 *кв*, имеющие плотность мощности 10^7—10^9 *вт/см*^{2} и выходную мощность до 3 *квт*.

Швы, сваренные высоковольтной сваркой, в закаленном состоянии имеют зону термического влияния менее 0,2 *мм*, поэтому разупрочненная зона не оказывает неблагоприятного воздействия на прочностные свойства соединения. При нагружении растягивающие напряжения поглощаются прочным металлом. Мягкая отожженная зона «поддерживается» более прочным основным металлом и прочной зоной металла шва; разрушения происходят по основному металлу.

21. Допустимые значения зазоров и депланации кромок при электроннолучевой сварке сталей

Толщина основного металла в *мм*	Зазор в стыке	Смещение по высоте
	(не более) в *мм*	
1,0—1,5	0,1	0,1
2,0 - 3,0	0,15	0,2
> 3,0	0,2	0,2

Оснастка для электроннолучевой сварки по назначению и конструкции подобна таковой для сварки вольфрамовым и плавящимся электродом в среде инертных газов.

Рекомендуемым типом соединения является соединение встык 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 из толщин по 1,5—2,0 *мм*. Возможна также сварка встык на весу. Свариваемые кромки должны быть обработаны под углом 90° на строгальных или фрезерных станках для продольных швов и на токарных — для кольцевых. Чистота торцовой поверхности должна быть не ниже ▽ 4. Заусенцы необходимо 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 поверхности абразивным камнем или наждачной шкуркой нежелательна из-за остатков абразива. Перед сборкой свариваемые кромки, подкладную планку, разжимные кольца или поверхность прижимов нужно обезжирить бензином «калоша» или ацетоном, применяя капроновые щетки или салфетки из батиста. Сборку заготовок под сварку рекомендуется производить с помощью зажимных (разжимных) приспособлений, обеспечивающих плотный и равномерный прижим заготовок по всей длине свариваемых кромок. Допустимые значения зазоров и депланация кромок (смещение по высоте) приведены в табл. 21.

Свариваемые заготовки и приспособления (кондукторы, зажимные устройства) до сварки подвергают размагничиванию для избежания смещения луча от центра шва. Необходимо предусматривать припуск (0,8 *мм*) по толщине свариваемых кромок на обработку лицевой и корневой поверхности шва в целях ликвидации возможных подрезов и проплавов. Если конструкция сварного соединения исключает доступ для обработки поверхности корня шва, необходимо предусмотреть выступ типа остающейся подкладки, который будет предотвращать проплавление шва и разбрызгивание металла. Ориентировочные режимы сварки сталей 30Х2ГСНВМ (ВЛ-1Д) и 42Х2ГСНМ (ВКС-1) приведены в табл. 22.

Соединения из стали ВКС-1 толщиной 2—4 *мм*, выполненные электроннолучевой сваркой в вакууме и подвергнутые термической обработке (закалке и низкому отпуску), при одинаковом уровне прочности имеют более высокие пла-

стические свойства по сравнению с соединениями, полученными аргоно-дуговой сваркой: $a_{тр} = 1{,}8$ *кГм/см*^{2}; угол загиба 52—64° и $a_{тр} = 0{,}8 \div 1{,}1$ *кГм/см*^{2}; угол загиба 30—35° соответственно.

Электронолучевая сварка термически упрочненной стали ВКС-1 обеспечивает прочность соединений не менее 90% прочности основного металла, а местный кратковременный высокотемпературный нагрев сварного соединения расфокусированным электронным лучом увеличивает угол загиба сварного шва на 20—30%. Сварные швы имеют равномерную мелкодисперсную структуру; при этом отсутствуют перегрев и образование сетки в околошовной зоне, характерные для аргоно-дуговой сварки.

При электронолучевой сварке высокопрочной стали ВКС-1 ($\delta = 2$ *мм*) остаточные напряжения не превышают по абсолютной величине 8 *кГ/мм*^{2}, вследствие чего не могут вызвать заметных деформаций или замедленного разрушения конструкции. Сварка электронным лучом значительно экономичнее сварки в инертных газах.

22. Ориентировочные режимы [1] электронолучевой сварки сталей 30Х2ГСНВМ (ВЛ-1Д) и 42Х2ГСНМ (ВКС-1) (сварка производилась на установке типа ЭЛУ-4)

Толщина свариваемых кромок в *мм*	Ускоряющее напряжение в *кв*	Ток эмиссии в *ма*	Скорость сварки в *м/ч*
1,5	60	17	70
2,0		23	
3,0		28	
4,0		32	

[1] Режимы должны уточняться в производственных условиях с учетом типа используемой электронной пушки, технологической оснастки, формы, размеров и конфигурации деталей и др.

По зарубежным данным при учете только эксплуатационных расходов (стоимость электроэнергии, инертного газа и т. п.) сварка электронным лучом оказывается в 35 раз дешевле сварки в камере с контролируемой атмосферой. Расход электроэнергии при электронолучевой сварке составляет 15—20% от расхода при автоматической дуговой сварке под флюсом.

ТОЧЕЧНАЯ И РОЛИКОВАЯ СВАРКА

Точечной и роликовой сваркой можно соединять детали и узлы из низколегированных и среднеуглеродистых сталей типа 30ХГСА, 12Г2А, 23Х2НВФА (ЭИ659) и 45; для сталей 30ХГСНА, 30Х2ГСНВМ (ВЛ-1Д), 42Х2ГСНМА (ВКС-1) и типа КВК точечную и роликовую сварку не применяют.

Точечной и роликовой сваркой сваривают листы, профили, а также детали, изготовленные резаньем с шероховатостью поверхности не ниже 4-го класса по ГОСТу 2789—59, толщиной $0{,}3 \div 0{,}3 \div 3{,}0 + 3{,}0$ *мм*.

Надежность сварных соединений, их стабильное качество могут быть получены только при обязательном соблюдении минимально допустимых геометрических размеров соединения, указанных в табл. 23.

Применение нахлестки меньше, указанной в таблице, не гарантирует качества сварного соединения.

Соотношение толщин свариваемых деталей в соединении должно соответствовать: для сварных соединений, прочность и герметичность которых обеспечивают общую эксплуатационную надежность изделия (I категория), — 2 : 1; для сварки соединений, несущих статические и динамические нагрузки, а также герметичные соединения, обеспечивающие эксплуатационную надежность узла (II категория), — 3 : 1; для сварных соединений второстепенного значения, несущих только статические нагрузки, не требующие герметичности и не оказывающие влияния на эксплуатационную надежность узла (III категория), — 3 : 1. Максимально допустимое количество деталей в соединении устанавливается: для I категории — 2, для II и III — 3.

Роликовую сварку деталей толщиной свыше 1,5 *мм* рекомендуется производить с прерывистым (шаговым) вращением роликов.

23. Размеры точечных и роликовых сварных соединений в *мм*

Толщина тонкой детали в соединении	Диаметр литого ядра сварной точки	Ширина литой зоны роликового шва	Минимальная величина нахлестки в точечных и роликовых соединениях	Шаг точек	Примечания
0,3	$2,5^{+1,0}$	$2,5^{+1,0}$	6,0	8,0	1. Рекомендуется при сварке соединения из трех деталей, а также ленты с листом увеличить величину нахлестки на 25—30%. 2. Шаг точек выбран из условия, когда его уменьшение требует (в целях сохранения размеров литой зоны) изменения режима сварки для компенсации шунтирования тока в соседние точки. 3. При сварке деталей с соотношением толщин более 2 : 1 шаг следует увеличить на 10—15%.
0,5	$3,0^{+1,0}$	$3,0^{+1,0}$	8,0	10,0	
0,8	$3,5^{+1,0}$	$3,5^{+1,0}$	10,0	12,0	
1,0	$4,0^{+1,0}$	$4,0^{+1,0}$	12,0	14,0	
1,2	$5,0^{+1,0}$	$5,0^{+1,0}$	13,0	16,0	
1,5	$6,0^{+1,0}$	$6,0^{+1,0}$	14,0	18,0	
2,0	$7,0^{+1,5}$	$7,0^{+1,5}$	16,0	20,0	
2,5	$8,0^{+1,5}$	$7,5^{+1,5}$	18,0	25,0	
3	$9,0^{+1,5}$	$8,0^{+1,5}$	20,0	30,0	

Соединение деталей следует выполнять не менее чем двумя точками. Наряду с точечной и роликовой сваркой допускается применение на одном узле любых других видов сварки, а также клепки.

Предназначенные для сварки детали должны быть очищены от жира, краски, масел, окислов и других загрязнений. Удаление жира, масел, краски производить ацетоном, бензином или другими растворителями.

Для подготовки поверхности деталей к сварке допускаются любые виды механической зачистки и химического травления, обеспечивающие надлежащее качество обрабатываемой поверхности. Детали, подготовленные под сварку, должны быть зачищены в местах сварки на ширину, соответствующую размеру нахлестки. В процессе сварки нельзя допускать попадания загрязнений под нахлестку. При сборке не разрешается грубая подгонка деталей с образованием хлопунов и больших зазоров. Величины допустимых зазоров для деталей различной толщины приведены в табл. 24.

24. Максимально допустимые зазоры при сборке в *мм*

Толщина тонкой детали	Зазоры на длине при сварке					
	точечной			роликовой		
	100	200	300	25	50	100
До 0,8	0,5	1,0	1,5	0,1	0,2	0,3
0,8 1,0 1,2	0,4	0,8	1,2			
2,0 2,5 3,0	0,3	0,6	0,9	0,05	0,1	0,2

При точечной сварке места прихваточных точек должны совпадать с местами сварных точек. При роликовой сварке прихваточные точки должны располагаться по осевой линии шва. Если детали имеют толщину свыше 2 *мм*, допускается постановка прихваточных точек в стороне от оси роликового шва. Прихватку деталей при точечной сварке производят на режимах, установленных для их сварки. Размеры точек при прихватке и сварке должны быть равны. Прихватка деталей, свариваемых роликовым швом, может производиться как на точечной, так и на роликовой машинах на режимах точечной сварки для данных металлов при снижении сварочного тока на 15—20%. Вмятины от прихваточных точек не должны превышать 10% толщины свариваемого металла. Длина прихватки на роликовой машине должна быть не больше двойной ширины литой зоны.

Ориентировочные режимы точечной и роликовой сварки указаны в табл. 25 и 26.

25. Ориентировочные режимы точечной сварки сталей 30ХГСА, 12Г2А, ЭИ659 и 45

Толщина тонкой детали в *мм*	1-й импульс (сварка)		Длительность паузы в *сек*	2-й импульс (термообработка)		Усилие электродов в *кГ*
	Ток в *а*	Длительность импульса в *сек*		Ток в *а*	Длительность импульса в *сек*	
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	800—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

Примечания. 1. При сварке закаленных сталей рекомендуется применять плавное нарастание тока в 1-м импульсе или перед 1-м импульсом производить подогрев дополнительным импульсом тока. Усилие сжатия электродов следует увеличить на 15—20%, а длительность 1-го импульса на 30—40%.

2. Допускается применение одного сварочного импульса, если узел подвергается после сварки термообработке.

26. Ориентировочные режимы роликовой сварки сталей 30ХГСА, 12Г2А, ЭИ659 и 45

Толщина тонкой детали в *мм*	Ток в *а*	Длительность в *сек*		Усилие роликов в *кГ*	Скорость сварки в *м/мин*
		импульса	паузы		
0,5	7,0—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—0,2	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—0,3	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	20,0—21,0	0,24—0,26	0,32—0,4	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

Примечание. Наружное охлаждение не допускается.

При роликовой сварке рекомендуется сваривать шов за один проход. В случае обрыва шва сварку следует начинать за 5—10 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 для сварки деталей данной толщины). Повторную сварку производят по любому из пересекающихся швов на длине не менее 10 точек (но 5 точек от места пересечения); уступ нахлестки в месте пересечения швов должен быть выполнен на «ус».

Для уменьшения коробления при сварке необходимо:

а) применять режимы сварки с малой длительностью импульса;

б) интенсивно охлаждать электроды и ролики;

в) использовать, где это возможно, электроды и ролики с одинаковыми рабочими поверхностями;

г) следить, чтобы смещение одного электрода относительно другого под действием усилия сжатия было минимальным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматическая электродуговая сварка. Под ред. Е. О. Патона. Киев, Машгиз, 1953.
2. Кудрявцев П. И. Остаточные сварочные напряжения и прочность соединений. М., «Машиностроение», 1964.
3. Межвузовская конференция по сварке. Сборник докладов под ред. д-ра техн. наук Николаева Г. А. М., Машгиз, 1958.
4. Мордвинцев Л. А. Технология сварки и пайки. Оборонгиз, 1957.
5. Николаев Г. А. Сварные конструкции. М., Машгиз, 1962.
6. Организация процессов сварки, резки, пайки, наплавки и металлизации. Вып. 35. Поплавко М. В. Сварка низколегированных сталей типа ХГСА и ХГСНА. Центральный Институт технико-экономической информации.
7. Петров Г. Д. и Тумарев А. С. Теория сварочных процессов. М., «Высшая школа», 1967.
8. Ратнер С. И. Разрушение при повторных нагрузках. М., Оборонгиз, 1959.
9. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. М., Машгиз, 1951.
10. Технология электрической сварки плавлением. Под ред. Б. Е. Патона. Киев, Машгиз, 1962.

ГЛАВА IV

СВАРКА ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СВАРИВАЕМОСТИ

Теплоустойчивыми называются стали, предназначенные для длительной работы при температурах 450—600° С. Эти стали используются преимущественно в энергетическом машиностроении при изготовлении деталей паровых котлов, турбин, атомных реакторов и теплообменников. 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 достигаются путем специального их легирования и применением термической обработки.

Сварка плавлением, в частности дуговая сварка теплоустойчивых сталей, сопровождается изменением свойств свариваемого металла, связанным с его расплавлением и кристаллизацией при образовании шва, а также структурными изменениями и упруго-пластическими деформациями в околошовной зоне. Это обусловливает физико-химическую неоднородность сварных соединений и образование местного сложнонапряженного состояния, что в ряде случаев ухудшает работоспособность и уменьшает эксплуатационную надежность конструкций.

Степень неоднородности сварных соединений определяется свойствами основного и присадочного металлов, технологией сварки и размерами свариваемых изделий.

Таким образом, свариваемость материала является сложной комплексной характеристикой, зависящей, кроме перечисленных выше факторов, также и от современного уровня технологии сварки и требований, предъявляемых к сварным соединениям. Чем неоднороднее структура и механические свойства, выше уровень и градиент напряжений в сварном соединении, чем сложнее технология сварки и меньше диапазон ее режимов, чем выше требования, предъявляемые к сварным соединениям, тем ниже степень свариваемости материала в данных условиях.

Сварные соединения из теплоустойчивых сталей подвергают в большинстве случаев термической обработке для снятия остаточных напряжений, стабилизации структуры и свойств. Что касается требований, предъявляемых к сварным соединениям, то они находятся обычно на уровне свойств свариваемых сталей. В связи с этим свариваемость теплоустойчивых сталей должна оцениваться сложностью применяемой технологии сварки и последующей термической обработки, которые обеспечивают минимальную физико-химическую неоднородность сварных соединений, а также возможной при этом степенью приближения кратковременных и длительных свойств сварных соединений к соответствующим свойствам основного металла.

ДУГОВАЯ СВАРКА

Выбор технологии

Тепловые условия сварки. Тепловые условия сварки или температурные режимы нагрева свариваемых сталей, а иногда и поддержание определенной температуры сварных соединений перед их термообработкой направлены на то, чтобы предотвратить образование холодных трещин.

При сварке теплоустойчивых сталей, в той или иной степени восприимчивых к закалке, образование холодных трещин в сварных соединениях связано в основном с превращением аустенита в мартенсит и происходит в период, предшествующий термической обработке сваренного изделия.

Сопутствующий сварке местный или общий подогрев изделия является надежным средством предотвращения холодных трещин, так как уменьшает разницу температур металла в зоне сварки и периферийных участках, что снижает уровень напряжений первого рода, вследствие чего пики этих напряжений в околошовных участках сглаживаются.

Подогрев также уменьшает скорость охлаждения металла в процессе термического цикла сварки, что предотвращает превращение аустенита в мартенсит, которое сопровождается резким увеличением удельного объема металла, вызывающим появление напряжений 2-го и 3-го рода.

Наконец, 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 уровня напряжений, поскольку образование трещин происходит в результате исчерпания деформационной способности металла под действием напряжений.

Рекомендуемые температуры предварительного и сопутствующего подогрева различных сталей в зависимости от толщины свариваемых изделий приведены в табл. 1.

1. Температура предварительного и сопутствующего подогрева в °С

Марка стали	Толщина свариваемых изделий в *мм*		Марка стали	Толщина свариваемых изделий в *мм*	
	7—30	Св. 30		7—30	Св. 30
12МХ 15ХМ 20ХМ-Л	150—250	200—300	15Х1М1Ф-Л 20ХМФ-Л	350—400	350—400
12Х1МФ 15Х1М1Ф	250—300	300—350	15Х11МФ 15Х12ВМФ 15Х11В2МФ (ЭИ756, ЦЖ5)	300—350	350—400

Поскольку перераспределение напряжений и структурные превращения могут иметь место и после окончания сварки, в ряде случаев необходимы дополнительные меры, предотвращающие образование холодных трещин в нетермообработанных сварных соединениях. К ним могут относиться: выдержка сварных соединений при температуре подогрева еще в течение нескольких часов для завершения превращений остаточного аустенита и эвакуации водорода, а также поддержание сварных соединений при повышенных температурах (150—200° С) вплоть до термической их обработки. Эти меры используются иногда при сварке толстостенных изделий из мартенситных 12%-ных хромистых сталей или перлитных хромомолибденованадиевых сталей (δ более 70 *мм*).

Сварочные материалы. При разработке покрытых электродов, сварочной проволоки и флюсов для сварки теплоустойчивых сталей стремятся, как правило, приблизить химический состав металла шва к основному металлу, 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 влекут за собой понижение длительной прочности и пластичности сварных соединений. Это явление наблюдается уже при небольшом отличии в легировании металла шва карбидообразующими элементами (например, сталь 12Х1МФ — шов 08Х2МФБ).

Содержание углерода в металле шва при сварке перлитных теплоустойчивых сталей обеспечивается сварочными материалами в пределах 0,06—0,12%. Подобное содержание углерода гарантирует необходимый уровень длительной прочности швов при достаточной стойкости сварных соединений против образования трещин. При сварке мартенситных и мартенситно-ферритных 10—12%-ных хромистых сталей содержание углерода в швах составляет обычно 0,12—0,17%. Это объясняется необходимостью поддержания количества структурно-свободного феррита (δ-феррита) в металле шва на низком уровне. При увеличении содержания структурно-свободного феррита более 10% порог хладноломкости швов сдвигается в область положительных температур, а длительная прочность их резко снижается [2].

Для ручной дуговой сварки теплоустойчивых сталей используют в большинстве случаев электроды с фтористо-кальциевым покрытием, основой которого являются карбонат кальция (мрамор) и флюорит (плавиковый шпат). Электроды с покрытием этого типа обеспечивают повышенную раскисленность металла шва при малом содержании неметаллических включений и водорода, вследствие чего достигается высокая пластичность и ударная вязкость швов. Однако электроды с покрытием этого типа для предотвращения обрадования пор в швах требуют сушки при 80—100° С перед их использованием, осуществления сварки при возможно короткой дуге и тщательной зачистки кромок от ржавчины и окалины.

Наиболее склонны к образованию пор, вызванных азотом, электроды малого диаметра. В связи с этим для сварки труб поверхностей нагрева котлов рекомендуется серия электродов марок ЦЛ-38, ЦЛ-39 и ЦЛ-40 диаметром 2,5 *мм* с повышенной надежностью газошлаковой защиты плавящегося металла.

Для автоматической сварки в сочетании с легированными проволоками применяют обычно 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 аргоно-дуговой сварке вольфрамовым электродом в качестве присадочного материала применяют обычно проволоку тех же марок, что и при сварке под слоем флюса. Рекомендации по применению сварочных материалов даны в табл. 2.

Ручную дуговую сварку покрытыми электродами широко 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 литья. Автоматическую сварку под слоем флюса применяют при сварке паропроводов и приварке донышек к коллекторам в заводских условиях. Полуавтоматическая сварка в среде углекислого газа начала использоваться при монтаже паропроводов. Аргоно-дуговая сварка вольфрамовым электродом применяется как в заводских, так и в монтажных условиях при сварке корневых слоев кольцевых швов труб поверхностей нагрева котлов и паропроводов, когда сварка осуществляется без подкладных колец.

Термическая обработка сварных соединений. Сварные конструкции теплоустойчивых сталей в большинстве случаев не могут эксплуатироваться непосредственно после сварки и требуют термической обработки для снятия внутренних

напряжений и выравнивания свойств металла в различных участках соединения. Исключение составляют сварные соединения из хромомолибденовых сталей (12МХ, 15ХМ, 20ХМ-Л) при толщине менее 10 *мм* и из хромомолибденованадиевых сталей (12Х1МФ, 15Х1М1Ф) при толщине менее 6 *мм*.

2. Сварочные материалы [1]

Марка стали	Электроды для ручной дуговой сварки	Флюсы и проволока для автоматической сварки	Проволока для полуавтоматической сварки в среде CO_2	Присадочная проволока для аргоно-дуговой сварки вольфрамовым электродом
12МХ	Тип ЭМХ Марки ЦЛ-14 и ЦУ-2МХ	АН-22, ФЦ-11, ЗИО-Ф2, Св-10МХ	—	Св-10МХ
15ХМ, 20ХМ-Л	Тип ЭХМ Марки ЦУ-2ХМ, ЦЛ-38, ЗИО-20, УОНИ-13ХМ	АН-22, ФЦ-11, ЗИО-Ф2, Св-10ХМ	Св-08ХГ2СМ	Св-10ХМ или Св-08ХГ2СМ
12Х1МФ, 15Х1М1Ф, 20ХМФ-Л, 15Х1М1Ф-Л	Тип ЭХМФ Марки ЦЛ-20А, ЦЛ-20Б, ЦЛ-20М, ЦЛ-39	АН-22, ФЦ-11, ЗИО-Ф2, Св-08ХМФ	Св-08ХГСМФ	Св-08ХМФ или Св-08ХГСМФ
12Х2МФСР, 15Х2МФБ	Тип ЭХ2МФБ, ЦЛ-40	—	—	Св-08ХМФ или Св-08ХГСМФ
15Х11МФ	Тип ЭФХ11МПФ Марка КТИ-9	—	—	Св-10Х11МФН
15Х12ВМФ, (ЭИ802, Х11ЛБ), 15Х11В2МФ (ЭИ765, ЦЖ5)	Тип ЭФХ12ВМНФ Марки КТИ-10, ЦЛ-32	АН-17 проволока ЭП-390	—	Св-10Х11ВМФН

[1] Указанные в таблице электроды отвечают требованиям ГОСТов 9466—60, 9467—60 и 10052—62, а проволоки — ГОСТа 2246—60.

Общая термическая обработка сварных конструкций может быть осуществлена лишь в заводских условиях для таких изделий (сварные роторы, диафрагмы турбин, коллекторы котлов, отливки с заваренными дефектами), которые могут быть целиком помещены в термические печи. Поэтому ряд сварных соединений подвергают местной термической обработке.

Что касается вида местной термической обработки, то нормализация с отпуском могла бы быть эффективным средством восстановления свойств участков основного металла, разупрочненных действием термического цикла сварки. Однако применение нормализации требует специальных присадочных материалов, обеспечивающих более высокую термическую прорабатываемость швов, близкую

к таковой у свариваемой стали. Кроме того, при нормализации необходимо применение общей термической обработки 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 приводит к снижению сопротивления ползучести и длительной прочности.

В связи с этим наиболее распространенным видом термической обработки сварных конструкций является общий или местный отпуск при температурах, близких к температуре отпуска свариваемых сталей.

Рекомендуемая температура и продолжительность отпуска сварных соединений приведены в табл. 3.

3. Температура и продолжительность отпуска сварных соединений

Марка стали	Температура в °С	Время в ч для толщин в мм			Марка стали	Температура в °С	Время в ч для толщин в мм		
		До 20	20—45	Выше 45			До 20	20—45	Выше 45
12МХ	680—700	1	2	3	15Х1М1Ф 15Х1М1Ф-Л	730—760	2	3	5
15ХМ 20ХМ-Л	700—730	1	2	3	15Х11МФ	720—730	4	5	5
12Х1МФ 20ХМФ-Л	720—750	2	3	5	15Х12ВМФ 15Х11В2МФ	740—760	5	5	7

Свойства сварных соединений

Дуговая сварка теплоустойчивых сталей в соответствии с изложенными выше рекомендациями обеспечивает кратковременные свойства сварных соединений на уровне соответствующих свойств основного металла. Однако длительная прочность соединений обычно ниже, чем у свариваемой стали. Это объясняется разупрочнением металла в околошовной зоне вследствие дополнительного высокотемпературного отпуска и неполной перекристаллизации при нагреве в интервале температур: отпуска стали — точки Ac_3. При этом степень разупрочнения сварных соединений, резко выявляемая при испытании на длительную прочность, зависит, с одной стороны, от погонной энергии сварки, а с другой — от степени упрочнения сталей термической обработкой и структурной стабильности (отпускоустойчивости) стали.

Как следует из данных табл. 4, длительная прочность основного металла и сварных соединений хромомолибденовой стали 20ХМ-Л [6] примерно одинакова. Это объясняется тем, что вследствие малой прокаливаемости и нерегламентируемой скорости охлаждения при нормализации стали этой группы упрочняется 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 20ХМФ-Л, 15Х1М1Ф охлаждаются при нормализации принудительно со скоростью порядка 1000° С/ч, а трубы из стали 12Х1МФ проходят закалку. Если нормализованные и отпущенные стали 20ХМФ и 15Х1М1Ф имеют при ручной и полуавтоматической сварке коэффициент теплоустойчивости

4. Свойства сварных соединений теплоустойчивых сталей

Марка стали	Вид сварки	Режим термической обработки сварного соединения	Механические свойства сварных соединений при 20° С					Предел длительной прочности за 100 000 ч в кГ/мм²	
			σ_2	$\sigma_{0,2}$	δ_5	ψ	$a_н$	стали	сварного соединения
			в кГ/мм²		в %		в кГм/см²		
20ХМ-Л	Ручная, электроды ЦУ-2ХМ	680—700° С 3 ч	45—50	23—34	13—22	28—53	14—20	28 при 475° С 6 при 550° С	23 при 475° С 6 при 550° С
	Полуавтоматическая в среде CO_2, проволока Св-08ХГ2СМ	680—700° С 3 ч	42—45	24—28	19—23	56—64	14—19		
20ХМФ-Л	Ручная, электроды ЦЛ-20А	700—720° С 3 ч	52—60	40—43	14—20	37—60	12—19	14 при 540° С	11 при 540° С
12Х1МФ		720—740° С 5 ч	52—58	43—45	15—17	73—75	13—15	8 при 585° С	5,5 при 585° С
15Х1М1Ф	Ручная, электроды ЦЛ-36*	740—760° С 5 ч	55—57	39—42	15—17	72—73	14—16	10 при 585° С	8,8 при 585° С
	Полуавтоматическая в среде CO_2, проволока Св-08ХГСМФ	710—730° С 3 ч	61—64	50—53	18—22	67—69	9—13	11 при 570° С	10 при 570° С
15Х11МФ	Ручная, электроды КТИ-9	720—730° С 5 ч	70—85	50—60	14—18	55—65	8—12	16 при 550° С	15 при 550° С
15Х11В2МФ (ЭИ756)	Ручная, электроды ЦЛ-32	740—760° С 5 ч	68—75	48—53	13—15	60—65	11—16	15 при 585° С	14 при 585° С
15Х11В2МФ (ЦЖ-5)		720—740° С 7 ч	64—68	45—50	9—15	30—55	7—11	9,7 при 610° С	8,2 при 610° С

* Электроды ЦЛ-36 рекомендуются обычно для сварки с последующей высокотемпературной термической обработкой (нормализацией с отпуском).

сварных соединений (т. е. отношение длительной прочности сварного соединения к длительной прочности свариваемой стали), равный 0,8—0,9, то для закаленной и отпущенной стали 12Х1МФ (толстостенные паропроводные трубы) он равен 0,7.

В табл. 4 приведены также данные [1,7] о свойствах сварных соединений высокохромистых сталей: мартенситной — 15Х11МФ и мартенсито-ферритной — 15Х11В2МФ (в деформированном состоянии ЭИ756, в литом — ЦЖ5). В связи с высоким уровнем легирования эти стали являются структурно-стабильными (отпускоустойчивыми) и в сравнительно малой степени подвержены разупрочнению при сварке. Коэффициент теплоустойчивости их сварных соединений изменяется в пределах 0,85—0,95. Кроме отмеченного преимущества, сварные соединения рассматриваемых сталей характеризуются высокой пластичностью в процессе длительных испытаний на растяжение. Так, при испытании в течение 3500—10 000 *ч* конечное относительное удлинение сварных соединений стали ЭИ756 составляет 5—7%, а сужение поперечного сечения 13—15%.

КОНТАКТНАЯ СТЫКОВАЯ СВАРКА

Контактная стыковая сварка непрерывным оплавлением является основным технологическим процессом при изготовлении элементов поверхностей нагрева котлов. При производстве одного современного котла производительностью 900—1000 *т* пара в 1 *ч* этим методом выполняют несколько десятков тысяч стыков труб диаметром 30—50 *мм*.

Сварка осуществляется на автоматизированных машинах ЦСТ-200 и ЦСТ-200М [4]. Привод оправления и осадки у машин раздельный. При оплавлении передвижение подвижной плиты машины осуществляется кулачковым механизмом с электроприводом постоянного тока, что обеспечивает возможность плавного регулирования скорости оплавления. Программа кулачка 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 (ЭИ531).

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 проводить при минимально возможном вторичном напряжении (5,5—6,5 *в*), исключающим возникновение коротких замыканий при оплавлении.

Припуск на оплавление выбирают в зависимости от толщины стенки трубы:

δ в *мм*	3	4	5	7
Припуск в *мм*	8	12	14	19

Длительность оплавления принимают из расчета обеспечения средней скорости оплавления 0,75—1,25 *мм/сек*. 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 от общего припуска на осадку. Скорость осадки рекомендуется для труб из стали 12Х1МФ и 15Х1М1Ф не менее 30 *мм/сек*, а для труб из сталей 12Х2МФСР и 12Х2МФБ не менее 60 *мм/сек*.

В отличие от сталей перлитного класса высокохромистые мартенситные и мартенситно-ферритные стали требуют более интенсивного оплавления на значительную величину, а также повышенного припуска на осадку и, особенно, под

током [10]. Примерный режим сварки труб диаметром 32 *мм* с толщиной стенки 6 *мм* из стали 15Х11В2МФ (ЭИ756) следующий:

Вторичное напряжение холостого хода в $_в$	7,7
Припуск на оплавление в *мм*	19—20
Скорость оплавления в *мм/сек*:	
средняя	1,3—1,4
конечная	7—8
Припуск на осадку в *мм*	7,0
То же под током	5,0
Давление осадки в *кГ/мм*^{2}	12—14

Для уменьшения внутреннего грата в ряде случаев во время сварки продувают трубы азотом или азотно-водородной смесью под избыточным давлением около 1,0 *кГ/см*^{2}. При этом в связи с охлаждающим действием газа на зону стыка режимы сварки труб поверхностей нагрева должны корректироваться в сторону увеличения времени сварки и припуска на оплавление [5].

Стыки труб из сталей 12Х1МФ и 15Х1М1Ф мало восприимчивы к закалке и термообработке после сварки могут не подвергаться [3]. Кратковременному отпуску следует подвергать стыки труб из сталей 12Х2МФБ (750 ± 10° С в течение 10—20 *мин*) и 15Х11В2МФ (770 ± 10° С в течение 10 *мин*).

ЛИТЕРАТУРА

1. Баженов В. В. Дуговая сварка теплоустойчивых сталей. М., «Машиностроение», 1967.
2. Баженов В. В., Федяева Т. Р. Сварка жаропрочных 10—12%-ных хромистых сталей, работающих при температуре до 600°С. Сб. ЦНИИТМАШ «Вопросы сварки в энергомашиностроении». М., Машгиз, 1962.
3. Гельман А. С. Исследование стыковой сварки оплавлением труб из перлитных и полуферритных сталей. Сб. ЦНИИТМАШ «Вопросы сварки в энергомашиностроении». М., Машгиз, 1962.
4. Гельман А. С., Слепак Э. С., Зыбко И. Ю. Машина для стыковой сварки труб ЦСТ-200. Сб. ЦНИИТМАШ № 74 «Усовершенствование технологии и оборудования для сварки давлением элементов поверхностей нагрева котельных агрегатов». ЦНИИТМАШ, М., 1967.
5. Гельман А. С., Ханкин В. И. Сварка труб поверхностей нагрева из перлитных сталей с продувкой газом при оплавлении. Сб. ЦНИИТМАШ № 74 «Усовершенствование технологии и оборудования для сварки давлением элементов поверхностей нагрева котельных агрегатов». ЦНИИТМАШ, М., 1967.
6. Герман С. И. Электродуговая сварка теплоустойчивых сталей перлитного класса. М., Машгиз, 1963.
7. Герман С. И., Кулакова Г. П. Сварка в среде углекислого газа. Харьковское книжное издательство, Харьков, 1962.
8. Земзин В. Н., Френкель Л. Д. Сварные конструкции паровых и газовых турбин. М., Машгиз, 1962.
9. Слепак Э. С., Демин В. В. Контактная стыковая сварка труб поверхностей нагрева из 12%-ных хромистых сталей. Сб. ЦНИИТМАШ № 74 «Усовершенствование технологии и оборудования для сварки давлением элементов поверхностей нагрева котельных агрегатов». ЦНИИТМАШ, М., 1967.

ГЛАВА V

СВАРКА АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ

СВАРИВАЕМОСТЬ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ

Общие сведения

В соответствии с основным служебным назначением аустенитные высоколегированные стали можно подразделить на три группы: коррозионностойкие; жаропрочные; жаростойкие (окалиностойкие).

В ряде случаев хромоникелевые аустенитные стали, вследствие их способности сохранять пластичность и высокую ударную вязкость при низких температурах, применяют в качестве хладостойких.

Аустенитные стали при соответствующем уровне легирования, а также после соответствующей термической обработки, обладают высокой коррозионной стойкостью в различных средах (атмосфера; водные растворы кислот, щелочей, солей; жидко-металлические среды и др.). Пригодность стали конкретной марки для тех или иных условий (сопротивляемость межкристаллитной коррозии, коррозионному растрескиванию, поверхностной коррозии) определяется ее составом и термической обработкой.

К группе жаропрочных относятся стали, обладающие способностью сохранять высокие механические свойства при повышенных температурах. Наибольшее значение при этом для сварных соединений имеют сопротивление стали ползучести и ее способность в течение длительного времени выдерживать заданную нагрузку (длительная прочность).

Жаропрочные стали в ряде случаев должны обладать также и коррозионной стойкостью (сопротивление воздействию внешней среды, часто в сочетании с рабочими напряжениями). Для придания более высокой жаропрочности в аустенитные стали часто вводятся элементы-упрочнители: вольфрам, молибден, ниобий и др.

Аустенитные хромоникелевые и хромомарганцовистые стали, благодаря наличию в них высокой концентрации хрома, обладают также и сопротивляемостью окислению в газовых средах при высоких температурах, т. е. окалиностойкостью. В стали этого класса, предназначенные для работы при высоких температурах в окислительных газовых смесях, с целью придания им высокой окалиностойкости вводят также кремний и алюминий. В ряде случаев окалиностойкие стали должны обладать и свойством жаропрочности.

Аустенитные стали построены главным образом либо на основе сплавов тройных систем железо — хром — никель, либо железо—хром — марганец с добавками никеля или без них. Существуют и марганцовистые аустенитные стали с достаточно высоким содержанием углерода.

В хромоникелевых сталях хром и никель служат основными легирующими элементами, обеспечивающими аустенитную структуру. Особенно большое распространение получили стали этого класса, содержащие около 18—20% Cr и 9—10% Ni (Х18Н10) с присадками различных элементов для придания этим сталям тех или иных свойств.

Углерод, присутствуя в хромоникелевых аустенитных сталях, стабилизирует аустенит и расширяет возможности их легирования ферритообразующими элементами (с сохранением аустенитной структуры справа). Обладая при повышении температуры возрастающей растворимостью в γ-твердом растворе (рис. 1), углерод при умеренно высоких температурах может служить за счет выпадения карбидов хрома причиной дисперсионного твердения стали (если она была предварительно подвергнута аустенизирующей термической обработке) и повышения ее прочностных характеристик при одновременном снижении пластических свойств. Дисперсионное твердение (упрочнение) может происходить за счет образования не только карбидов хрома, но также и карбидов других элементов, обладающих высоким сродством к углероду.

Титан в жаропрочных сталях с карбидным упрочнением, вводимый в количестве до 0,5%, повышает длительную прочность [93]. При избытке титана против стехиометрического соотношения TiC углерод оказывается полностью связанным в прочный карбид титана и сталь приобретает нечувствительность к межкристаллитной коррозии. В аустенитных сталях и сплавах с интерметаллоидным упрочнением титан совместно с алюминием оказывает сильное упрочняющее действие за счет образования дисперсной γ^1-фазы типа $Ni_3(Al, Ti)$. Титан обладает большим сродством к кислороду. Поэтому для его введения в шов требуется применять специальные металлургические меры против активного окисления.

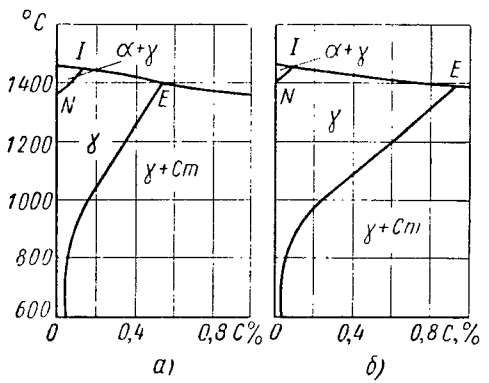


Рис. 1. Диаграмма состояния сталей (металлическая основа — углерод) [1]: *а* — 18% Cr и 8% Ni; *б* — 12% Ni

Ниобий действует во многих отношениях подобно титану. При отношении $\frac{Nb}{C} > 10$ (для некоторых сплавов и выше) аустенитная сталь становится не склонной к межкристаллитной коррозии. В ряде случаев ниобий полезен с точки зрения ограничения охрупчивания стали, связанного с дисперсионным твердением за счет других карбидообразующих элементов (кроме титана). В глубокоаустенитных сварных швах ниобий может вызвать горячие трещины, связанные с образованием эвтектик $FeNb_2$ — металлическая основа сплава, имеющих относительно невысокую точку плавления. При сохранении отношения ниобия к углероду, равного 10, ниобий может служить средством повышения трещиноустойчивости швов.

Ниобий имеет меньшее, по сравнению с титаном, сродство к кислороду. Поэтому легирование металла шва этим элементом в заданных пределах выполняется относительно просто.

Некоторые композиции аустенитных сталей могут иметь первичный δ-феррит. Небольшое количество этой фазы (1—6%) полезно с точки зрения снижения склонности стали к горячим трещинам, хотя и может способствовать процессу сигматизации (образование σ-фазы). σ-фаза может образоваться в аустенитных хромоникелевых сталях при концентрациях хрома в них 16—25% и более. Особенно благоприятствует образованию σ-фазы исходная двухфазная аустенитно-ферритная структура.

В процессе кристаллизации сплавов на основе Fe—Cr—Ni, или же в процессе высокотемпературной выдержки легирующие элементы, как сказано выше, могут, кроме карбидов хрома и σ-фазы, образовать прочные карбиды ниобия,

титана, ванадия (NbC, TiC, VC), а также интерметаллические соединения типа Ni_3Ti, $Ni_3(Al, Ti)$, Fe_2W и др. Указанные соединения, а также σ-фаза могут выделяться в процессе эксплуатации сплава при высоких температурах и упрочнять его, но вместе с этим снижать пластичность и ударную вязкость сплава, т. е. приводить к процессам старения.

В связи с этим аустенитные хромоникелевые жаропрочные стали иногда классифицируют в зависимости от природы упрочняющих частиц на:

а) стали с карбидным упрочнением, в которых упрочняющими частицами в основном является дисперсная карбидная фаза ($Cr_{23}C_6$, NbC, TiC и др.);

б) стали с интерметаллидным упрочнением, в которых упрочняющими частицами является интерметаллидная фаза (Ni_3Ti; $Ni_3(Al,Ti)$; Fe_2W и др.).

Во многих аустенитных сталях имеет место комплексное карбидное и интерметаллидное упрочнение.

В хромомарганцовистых сталях железо и марганец образуют непосредственно после затвердевания непрерывный ряд твердых растворов с γ-решеткой. В процессе дальнейшего охлаждения, при соответствующих концентрациях, сплавы могут иметь аллотропические превращения. При достаточно высокой концентрации марганца и углерода сталь может иметь аустенитную структуру. Среди этих сталей наибольшим применением пользуется сталь Гадфильда (11—13% Mn и около 1% C). При замедленном охлаждении или нагреве при умеренных температурах в сплавах ферритного или аустенитно-ферритного типа и при высоком содержании хрома наблюдается выделение σ-фазы (рис. 2). В сталях с содержанием менее 14% Cr и 15% Mn, относящихся к группе аустенитно-мартенситных, введение никеля способствует понижению точек мартенситного превращения и увеличению количества аустенита.

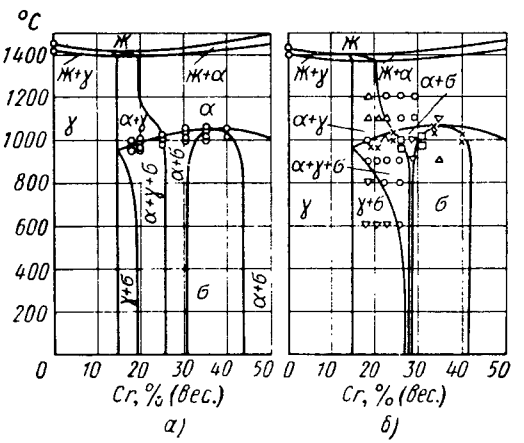


Рис. 2. Сечения тройной диаграммы железо — хром — марганец в зависимости от содержания хрома: *а* — 6% Mn; *б* — 16% Mn

Введение углерода в хромомарганцовистые и хромомарганцовоникелевые стали приводит к расширению γ-области, дисперсионному твердению сталей после соответствующей термической обработки и повышению прочности, в особенности, когда он вводится в сталь вместе с такими карбидообразующими элементами, как ванадий, ниобий, вольфрам.

Особенности сварки

Для соединения аустенитных сталей принципиально можно применять различные методы сварки: дуговую качественными (толстопокрытыми) электродами, под флюсом, газоэлектрическую, электрошлаковую, плазменную, электронно-лучевую.

Дуговая сварка качественными электродами наиболее маневренна, она позволяет воздействовать через электродный стержень и покрытие на химический состав металла шва в сторону его улучшения (корректирования) для повышения жаропрочности, а также технологической прочности (повышение сопротивляемости образованию горячих трещин).

Газоэлектрическая сварка используется в нескольких вариантах: а) неплавящимся вольфрамовым электродом непрерывно горящей или импульсной дугой [68]; б) плавящимся металлическим электродом. Первый вариант процесса применяется для выполнения протяженных швов на относительно тонкостенных элементах, стыковых соединений труб небольшого диаметра (примерно до 60 *мм*), а также для наложения корневых валиков в разделке при выполнении сварки толстостенных элементов. В качестве защитной среды преимущественно используется аргон иногда с добавкой водорода. Особенности кристаллизации металла сварочной ванны при импульсно-дуговой сварке позволяют улучшить формирование шва, способствуют дезориентации столбчатой его структуры, а также уменьшить тепловое воздействие на околошовные зоны. Последнее обстоятельство приводит к минимальному короблению свариваемых кромок, отсутствию «провисания» зоны проплавления, а также повышает сопротивляемость шва образованию горячих (кристаллизационных и полигонизационных) трещин. Однако импульсный процесс сварки некоторых аустенитных (в особенности, литых) сталей может повести к образованию околошовных надрывов.

Газоэлектрическая сварка плавящимся электродом применяется для выполнения соединений средней и большой толщины в несколько проходов. Этот процесс часто осуществляется на импульсном режиме [66], сущность которого заключается в том, что на постоянный сварочный ток накладываются кратковременные достаточно мощные импульсы тока.

Электрошлаковая сварка аустенитных жаропрочных сталей принципиально возможна при выполнении соединений большой толщины. Однако вследствие длительного и глубокого воздействия термического цикла электрошлакового процесса на зону термического влияния аустенитные жаропрочные стали многих марок могут иметь в околошовной зоне склонность к локальным разрушениям.

Весьма перспективен для сварки аустенитных сталей электроннолучевой процесс в вакууме, позволяющий рафинировать металл шва по некоторым вредным примесям. Однако сварка материала большой толщины затруднена из-за непостоянства глубины проплавления, сложности обеспечения сборки без зазоров и др. В некоторых случаях допускается узкий зазор между соединяемыми частями, который заполняют тонкой лентой или фольгой. Наличие тонких прокладок в свариваемом стыке дает возможность путем соответствующего подбора состава прокладки влиять в благоприятную сторону на технологическую прочность сварного шва.

Большим преимуществом электроннолучевой сварки является относительно малое значение удельной погонной энергии, что приводит к относительно небольшому влиянию источника тепла на околошовную зону, с точки зрения глубины воздействия на ее структуру, а также малых остаточных деформаций свариваемых элементов и возможности получения большой точности конструкции.

В ближайшем будущем несомненно найдет применение для выполнения конструкций из жаропрочных сталей плазменная сварка, которая может быть использована не только для весьма тонких (микроплазма), но также и для материалов относительно большой толщины. Этот процесс применяют при сварке элементов толщиной до 20,0 *мм*.

Особенности сварки аустенитных сталей и сплавов определяются их природой и теплофизическими свойствами (табл. 1). Основное влияние на распределение температуры в околошовной зоне при сварке сталей оказывает их теплопроводность [75]. При одинаковом значении погонной энергии при сварке области, нагретые выше некоторой определенной температуры, в аустенитной стали оказываются более развитыми, чем при сварке углеродистой стали (рис. 3). Одинаковое тепловое воздействие на основной металл при сварке аустенитной стали, с точки зрения размеров зоны проплавления, достигается при меньшем значении эффективной погонной энергии по сравнению с малоуглеродистой сталью. Поэтому, например, дуговая сварка аустенитных сталей осуществляется, при прочих равных условиях, на пониженных значениях тока.

1. Теплофизические свойства хромоникелевых аустенитных сталей [48, 49]

Свойства	Тип стали	
	18-8	25-20
Температура плавления в °С	1400—1425	1388—1410
Плотность в *г/см*³	7,90	7,82
Удельная теплоемкость в *кал/град*	0,12	0,12
Коэффициент теплопроводности в *кал/см·сек·°С*	0,039	0,03—0,04
Коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^{-6}$ при нагреве:		
от 0 до 100° С	17,3	15,0
» 0 » 500° С	18,5	18,0
Электрическое сопротивление при 20° С в *ом·мм²/м*	0,73	0,73
Температура начала интенсивного окалинообразования в °С	850—900	1150

Хромоникелевые аустенитные стали обладают электрическим удельным сопротивлением, примерно в 5 раз более высоким, чем малоуглеродистые. По-

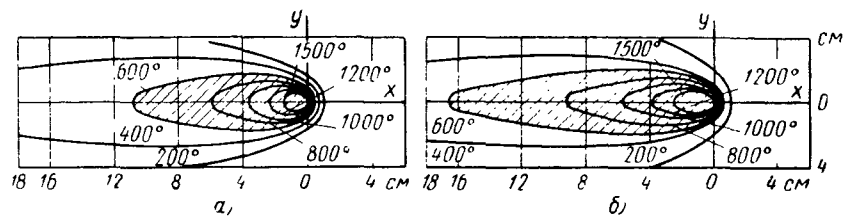


Рис. 3. Температурное поле линейного подвижного источника в пластине толщиной 1 *см*. Эффективная погонная энергия 5000 *кал/см*: *а* — сталь малоуглеродистая; *б* — сталь хромоникелевая

этому при дуговой сварке допустимая плотность тока в электродном стержне и сварочный ток при данном диаметре электрода ниже, чем при сварке углеродистых сталей.

Диаметр электродного стержня в *мм*	2	3	4	5
Сварочный ток в *а*	50—70	60—90	85—140	110—160

Из тех же соображений при дуговой сварке штучными электродами длину электродных стержней выбирают несколько меньше, чем при сварке углеродистых сталей.

Закономерности образования и поддержания подвижной ванны жидкого металла при сварке аустенитных сталей качественно имеют тот же характер, что и при сварке углеродистой стали [29].

Большинство аустенитных сталей не претерпевает полиморфных превращений. В охлажденном шве поэтому практически фиксируется состояние твердого раствора, отвечающего температуре реального солидуса.

Суммарная внутренняя пластическая деформация металла шва и околошовных зон при одинаковом термическом цикле и прочих равных условиях (метод сварки, геометрия свариваемых кромок, жесткость соединения, величина зазоров и т. д.) при сварке аустенитной стали, благодаря более высокому значению коэффициента теплового расширения и отсутствию полиморфных превращений, протекает значительно интенсивнее, нежели при сварке перлитных сталей. При многослойной сварке околошовная зона и нижележащие слои металла шва подвергаются многократному пластическому обжатию и растяжению, в результате чего они могут заметно упрочниться. Это явление получило название «самонаклепа при сварке» [36].

Степень самонаклепа зависит от жесткости свариваемых элементов (табл. 2).

2. Свойства металла шва, выполненного аустенитными электродами ЦТ-7 [30]

Условия сварки	Термическая обработка	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_в$	δ_5	ψ
		в $кГ/мм^2$		в %	
Незакрепленные пластины	Исходное состояние	38,5	60,5	40,0	50,0
Жесткий узел	То же	52,7	66,9	27,4	49,2
То же	Аустенизация при 1100° С в течение 2 ч	27,0	64,1	56,1	56,3

При сварке весьма жестких соединений явление самонаклепа (в сочетании с последующей аустенизацией) без какого-либо внешнего механического воздействия, которое могло бы дополнительно пластически деформировать (наклепать) материал, иногда приводит к частичной рекристаллизации металла шва в процессе его последующей высокотемпературной термообработки.

Так как остаточные сварочные напряжения определяют упругими свойствами, условно оцениваемыми величиной $\sigma_{0,2}$, то в относительно более жестких сварных соединениях, в которых за счет самонаклепа повышены прочностные характеристики, имеет место и более высокий уровень остаточных напряжений (табл. 3).

3. Остаточные (тангенциальные) напряжения в $кГ/мм^2$ в кольцевых швах различной жесткости аустенитных сталей ЭП257 и ЭП680, выполненных электродами ЦТ-7 [66]

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	—	—	—

В отдельных случаях уровень остаточных напряжений в зоне сварки жестких узлов из аустенитных сталей достигает 45—50 $кГ/мм^2$. Вследствие высокого коэффициента теплового расширения под влиянием термодеформационного цикла конечная усадка в зоне сварных соединений аустенитных сталей представляет заметную величину. При сварке многослойных швов поперечная усадка особенно активно протекает при наложении нижних слоев металла (рис. 4), постепенно уменьшаясь в процессе выполнения последующих валиков. Послойный ударный (механический) наклеп металла шва несколько уменьшает усадку, но при сварке жестких соединений не только не приводит к снижению уровня остаточных напряжений, но скорее наблюдается обратная тенденция.

Такой относительно высокий уровень остаточных напряжений, сочетающийся с низкой релаксационной способностью аустенитных сталей, требует особого подхода к режиму термообработки сварных конструкций из аустенитных сталей (см. ниже), целью которой является не только снижение до минимального уровня сварочных напряжений, но и снятие самонаклепа, а также возможно более полная гомогенизация физических свойств и структуры сварного соединения.

Одним из наиболее трудных вопросов сварки аустенитных сталей является предупреждение образования и развития горячих трещин, которые могут на-

блюдаться как в виде мельчайших микронадрывов, так и достаточно крупных макроскопических несплошностей. В большинстве случаев горячие трещины носят межкристаллитный характер. Горячие трещины в аустенитных сварных соединениях могут возникнуть в процессе сварки, при термической обработке сварных конструкций, а также в процессе эксплуатации конструкции при высоких температурах.

Трещины коррозионного характера (межкристаллитная коррозия, ножевая коррозия, коррозионное растрескивание) здесь не рассматриваются. Горячие трещины, возникающие в процессе сварки, могут наблюдаться как в металле шва, так, в ряде случаев, и в околошовных зонах. Для предотвращения горячих трещин в гетерофазных и гомогенных аустенитных швах возможны следующие пути:

1. Ограничение вредных, а также ликвирующих примесей, образующих жидкие прослойки (пленки) на завершающей стадии кристаллизации металла шва (табл. 4). Для получения сварочных материалов (*проволока*, электроды), в минимальной степени засоренных вредными примесями, необходимо применять чистую шихту, а саму плавку стали для глубокоаустенитных сварочных проволок целесообразно вести с применением вакуума или других средств рафинирования металла, например, электрошлакового переплава.

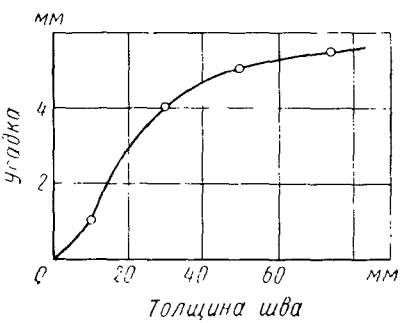


Рис. 4. Нарастание поперечной усадки стыкового соединения большой толщины по мере заполнения разделки. Аустенитная сталь Э11405, электроды ЦТ-7

2. *Повышение содержания некоторых* ликвирующих элементов до концентраций, обеспечивающих на завершающей стадии неравновесной кристаллизации шва в его структуре сплошную объемную сетку эвтектики.

3. Блокирование или торможение полигонизационных процессов закристаллизовавшегося металла шва при температурах, близких к солидусу. Реализация этого пути возможна за счет комплексного легирования сварочной ванны, обеспечивающей высокотемпературную гетерогенизацию (*карбидная фаза*, δ-феррит) и введения в шов (сварочную ванну) элементов, повышающих энергию активации процесса полигонизации и, следовательно, приводящих к уменьшению подвижности дефектов решетки [45, 46]. Одним из наиболее действительных средств борьбы с горячими трещинами является применение швов таких композиций, которые обеспечивают наличие δ-феррита в структуре шва. Однако в швах, предназначенных для высокотемпературной службы, количество δ-феррита должно быть ограничено примерно 4—5%, исходя из соображений предотвращения чрезмерного развития последующей сигматизации [30, 31, 36]. Необходимо добавить, что использование аустенитно-ферритных швов возможно только до *некоторого* температурного уровня (примерно до 650° С, иногда до 700° С).

Благоприятное действие δ-феррита на уменьшение склонности аустенитных швов к горячим трещинам может быть также объяснено тем, что феррит растворяет ряд элементов (примесей) до более высоких концентраций, нежели аустенит, и, тем самым, *уменьшает* их ликвацию [25], а также приводит к дезориентации и изменению первичной структуры.

Более полная степень окисления сварочной ванны (повышение содержания кислорода) способствует образованию горячих трещин. Это связано с тем, что кислород находится в аустенитных швах, в основном, в виде окисных включений, которые могут привести к образованию межкристаллитных окисно-сульфидных пленок. Кроме этого, кислород приводит к окислению хрома и других ферритообразующих элементов (кремний, титан), что может вызвать не только изменение,

но и полное исчезновение первичного δ-феррита в структуре аустенитно-ферритного шва [38, 49, 66] и, следовательно, возрастание его склонности к горячим трещинам.

4. Влияние элементов на склонность аустенитно-ферритных и полностью аустенитных швов к образованию горячих трещин [38]

Элемент	Влияние элемента на склонность к образованию горячих трещин при повышении его содержания в шве	
	аустенитно-ферритном (1—5% феррита)	аустенитном
C	Несколько увеличивает	При малых концентрациях несколько уменьшает, в особенности в швах, содержащих ниобий, титан, кремний
S	Увеличивает	Сильно увеличивает
P	»	То же
Si	Не влияет (при содержании до 3—4%)	Увеличивает
Mn	Немного уменьшает	Уменьшает
Nb	Не влияет (при содержании до 1,2%)	Увеличивает; совместно с углеродом в соотношении $\frac{Nb}{C} = 10$ уменьшает
Ti	Не влияет (при содержании до 1%)	Увеличивает; совместно с углеродом в соотношении $\frac{Ti}{C} = 6$, по-видимому, уменьшает
Mo	Несколько уменьшает	Существенно уменьшает
W	То же	По-видимому, несколько уменьшает
V	Не влияет (при содержании примерно до 1,5%)	Несколько увеличивает; совместно с углеродом, вероятно, уменьшает
O	Увеличивает	Увеличивает
N	?	?
As, Sn, Pb	Увеличивает	Сильно увеличивает
B	Увеличивает при малых концентрациях (сотые доли процента и менее)	Сильно увеличивает при содержании в сотых долях процента; уменьшает при содержании 0,5—1% (образование сплошной сетки боридной эвтектики)
H	По-видимому, не влияет	Несколько увеличивает
Cu	Несколько увеличивает	По-видимому, влияет незначительно; при повышенной концентрации марганца — увеличивает

Азот, по-видимому, до относительно невысоких концентраций (порядка 0,05%) способствует дезориентации и изменению структуры, а при более высоком содержании действует как аустенизатор.

В аустенитных швах водород может способствовать образованию горячих трещин вследствие вероятного его выделения в субмикроскопических несплошностях, а также по причине образования надрывов по механизму, близкому к флокенообразованию в сварных швах на низколегированных сталях [71].

Снижению склонности аустенитных сталей и сплавов к горячим околошовным трещинам способствует возможно более полное рафинирование основного металла (вакуумная выплавка, электрошлаковый переплав, применение чистых шихтовых материалов), а также аустенизирующая термическая обработка при высоких температурах (не приводящих к росту зерна), измельчение зерна. Все это снижает сегрегацию примесей и легирующих элементов на границах зерен. Одним из надежных путей снижения склонности крупнозернистых литых аустенитных сталей к горячим околошовным трещинам является выбор такой их композиции, которая обеспечивает регулируемое количество δ-феррита в их структуре. Склонность некоторых литых аустенитных сталей к околошовным трещинам может быть существенно снижена путем предварительного интенсивного наклепа свариваемых кромок перед наложением швов на глубину, превышающую про-

плавление основного металла. Такой наклеп можно осуществить пневматическим бойком. Под влиянием сварочного тепла происходит рекристаллизация металла околошовной зоны и резкое измельчение зерна в зоне взаимной кристаллизации (рис. 5). Однако такого рода наклеп не для всех аустенитных литых сталей дает положительные результаты.

Влияние напряжений и усадочных деформаций — силового фактора на образование горячих трещин изучено сравнительно мало. Регулирование силового фактора с достаточной эффективностью возможно при сварке относительно тон-

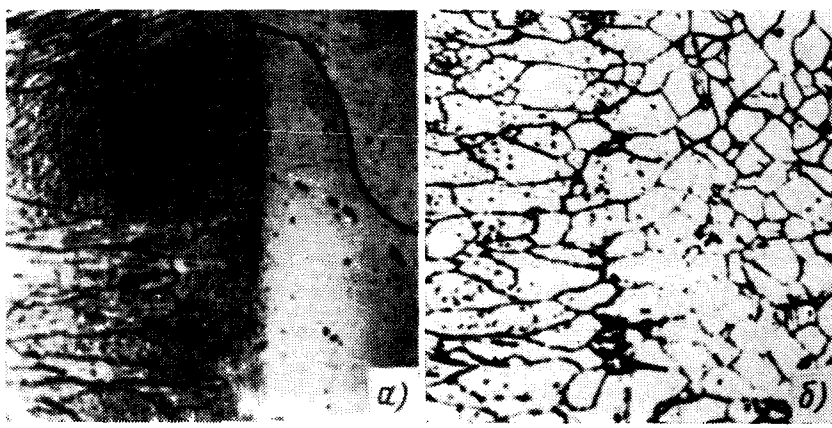


Рис. 5. Влияние предварительного наклепа свариваемых кромок литой стали Х15Н15К3 на величину зерна в зоне сплавления: *а* — кромки не подвергались наклепу; *б* — кромки наклепаны. Слева металл шва [30]

ких изделий путем их жесткого закрепления в специальных приспособлениях и предварительного обжатия (уменьшение внутренней деформации).

Предварительный и сопутствующий подогрев, дающий положительные результаты при сварке сталей перлитного класса, применительно к аустенитным сталям в ряде случаев не дает (с точки зрения снижения склонности к образованию горячих трещин) заметного эффекта, а скорее сказывается отрицательно вследствие расширения зоны пластического деформирования основного материала или нижележащих валиков металла шва и, как следствие, усиливает действие этого фактора.

Снижение действия силового фактора при сварке аустенитных сталей в жестких конструкциях (соединениях) возможно путем: а) ограничения тока и диаметра электрода (в особенности для глубокоаустенитных сталей); б) заполнения разделки валиками относительно небольшого сечения, что особенно важно при сварке глубокоаустенитных сталей (при сварке электродами, обеспечивающими наличие ферритной фазы в металле шва, этот прием не имеет существенного значения); в) заделка кратеров при обрыве дуги, а иногда и их вырубка или выплифовывание; г) применение надлежащих конструкций разделок кромок (рис 6) при сварке жестких узлов.

Одним из основных условий, обеспечивающих достаточную сплошность металла шва и сварных соединений, является выбор надлежащего состава присадочных материалов.

При дуговой сварке очень важно поддержание короткой дуги и небольшого вылета электрода (при газоэлектрической сварке); короткая дуга уменьшает

возможное окисление хрома и азотизацию сварочной ванны, что благоприятно влияет на трещиноустойчивость шва.

Большое значение также имеет выполнение первых (корневых) слоев шва электродами (проволоками), обеспечивающими необходимое количество ферритной фазы в структуре металла шва при сварке аустенитно-ферритными электродами или таких элементов, как молибден и марганец, — при сварке электродами с чисто аустенитной основой (из-за относительно большего проплавления основного металла) — при сварке сталей, допускающих использование этих электродов.

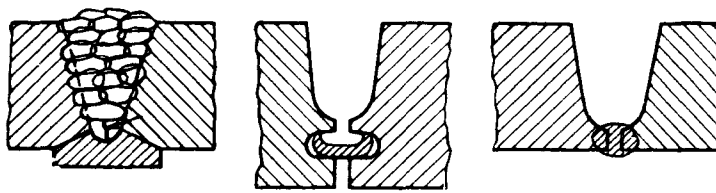


Рис. 6. Различные формы разделки при сварке жестких сварных соединений (толстостенные элементы): *а* — на остающейся подкладке (возможны трещины — усы, показанные стрелкой; *б* — подкладка корытообразной формы, предотвращающая появление усов [40]; *в* — аргоно-дуговая сварка корня шва с обеспечением полного провара

Необходимо также следить за надлежащей прокалкой электродов и флюсов и хранением их в термостатах для обеспечения минимальной влажности, так как водород при сварке аустенитных сталей может способствовать образованию горячих трещин.

Материалы для сварки

Одна из основных задач, возникающих при сварке жаропрочных сталей, заключается в выборе такого сочетания сварочных материалов, которое обеспечивает получение бездефектного металла шва, удовлетворяющего по своим свойствам требованиям, предъявляемым к нему условиями эксплуатации конструкции.

Наиболее просто эта задача решалась бы путем получения гомогенного по химическому составу сварного соединения, т. е. воспроизведением в металле шва композиции свариваемой стали. Однако во многих случаях это неосуществимо из-за развития в шве горячих трещин. Большие затруднения возникают также при попытках введения в шов титана и алюминия, так как коэффициент перехода этих элементов при использовании обычных покрытий с силикатным связующим весьма мал; легирование швов ниобием, кремнием, бором часто приводит к образованию в них трещин. Поэтому при подборе присадочных материалов для сварки аустенитных сталей часто ориентируются на получение шва, по химическому составу несколько отличающегося от основного металла.

Наиболее надежный метод предотвращения горячих трещин в аустенитных швах заключается в получении двухфазной аустенитно-ферритной структуры. Следует отметить, что стойкость против образования горячих трещин аустенитно-ферритных швов зависит от системы их легирования (рис. 7). Этот метод (обеспечение 1—5% ферритной составляющей в структуре шва) может быть использован только для сварки сталей с относительно небольшим «запасом аустенитности». Сварка глубокоаустенитных сталей производится с использованием присадочных материалов, обеспечивающих в швах чисто аустенитную структуру металлической основы. Методы предотвращения образования горячих трещин в швах при

сварке сталей с большим запасом аустенитности [1] ($[Ni]_э/[Cr]_э > 1$) в значительной степени зависят от их химического состава. Из этих методов в первую очередь следует отметить следующие три: легирование шва до 6—7% Mn; введение в шов до 5—7% Mo и легирование шва одновременно углеродом и ниобием (1,5—2,5%) при соблюдении стехиометрического соотношения в шве этих элементов, отвечающего карбиду ниобия, что приближенно составляет

$$\frac{\%C}{\%Nb} = \frac{1}{10}.$$

Однако глубокоаустенитные сварные швы по стойкости против образования горячих трещин уступают швам аустенитно-ферритным (рис. 8). Кроме этого,

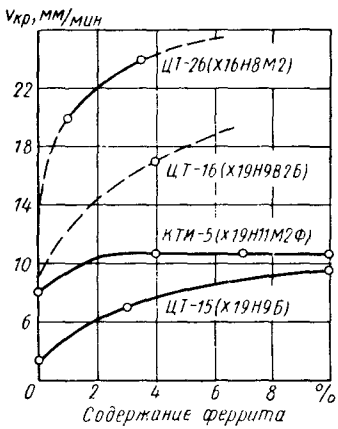


Рис. 7. Сопротивляемость образованию горячих трещин металла, наплавленного аустенитно-ферритными электродами некоторых марок

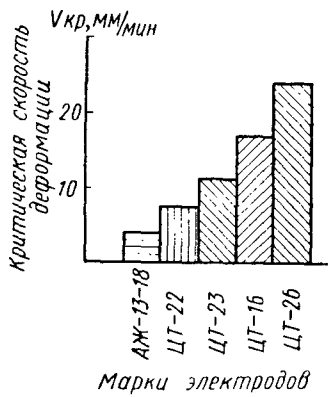


Рис. 8. Сопротивляемость образованию горячих трещин металла, наплавленного жаропрочными электродами некоторых марок, оцениваемая критической скоростью деформации при сварке. АЖ-13-18 и ЦТ-22 — глубокоаустенитные электроды, ЦТ-16 и ЦТ-26 — аустенитно-ферритные электроды (ЦНИИМАШ)

они очень чувствительны к загрязнениям вредными примесями (сера, фосфор, свинец и др.). Поэтому рафинирование металла, предназначенного для сварочной проволоки, от вредных примесей имеет первостепенное значение. Повышенные концентрации кремния (свыше 0,3—0,5%), а также ниобия могут вызвать образование в них горячих трещин.

При сварке аустенитных сталей следует преимущественно пользоваться легированием через присадочную проволоку, а не через покрытие и тем более через флюс (керамический), так как в последнем случае значительно труднее обеспечить макрохимическую однородность шва, вследствие бо́льшей чувствительности его к случайному изменению таких факторов, как колебание напряжения на дуге, неравномерности распределения ферросплавов в замесе покрытия или флюса, возможная сегрегация металлической составляющей в процессе пересыпания

[1] Запас аустенитности выражается отношением никелевого эквивалента к хромовому эквиваленту стали $\frac{[Ni]_э}{[Cr]_э}$ (иногда упрощенно $\frac{\%Ni}{\%Cr}$).

5. Флюсы для электродуговой и электрошлаковой

Марка флюса	Метод изготовления	Химический				
		SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	CaF_2
АН-26	Выплавка	30,0—32,0	20,0—22,0	5,0—6,5	16,0—18,0	20,0—24,0
48-ОФ-10	То же	9,0—12,0	28,0—34,0	До 8,0	11,0—14,0	35,0—45,0
АНФ-14	»	14,0—16,0	10,0—12,0	До 8,0	4,0—8,0	60,0—65,0
АНФ-16	»	До 5,0	23,0—32,0	До 5,0	5,0—9,0	50,0—55,0
48-ОФ-6	»	Не более 4,0	20,0—27,0	16,0—23,0	3,0	45,0—60,0
АНФ-5	»	Не более 2,0	—	—	—	75,0—80,0
АНФ-1	Грануляция минерала	Не более 5,0	—	—	—	Не менее 92,0
АНФ-6	Выплавка (состав шихты)	—	35,0	—	—	65,0
АНФ-7	То же	—	—	20,0	—	80,0
АН-29	Выплавка	Следы	40,3—50,0	35,0—45,0	—	10,0—15,0
АН-292	»	До 1,5	58,0—61,0	33,0—37,0	4,0—7,0	—
АН-22	»	—		2—3		86—92
АНФ-8	»	До 2,0	25—35	12—18	—	45—55
АНФ-17	»	Следы	22—27	3—5	—	48—55
ФЦК	Спекание при 750° С	—	10,0	—	—	77,0
ФЦК-С	пекание при 400°	—	9,6	—	—	74,5
ХНК-66	Спекание	23,0	28,0	18,0$CaCO_3$	20,0	17,0
К-8		4,0—5,0	4,5—5,0	54,0—58,0	8,5—11,0	5,0—6,0

сварки аустенитных сталей

состав в %					Назначение
NaF	Прочие составляющие	FeO	S	P	
		не более			
—	—	1,0	0,07	0,10	Автоматическая электродуговая сварка сталей с небольшим запасом аустенитности аустенитно-ферритными швами
—	—	—	—	—	Автоматическая сварка, аустенитно-ферритные швы, наплавка
—	—	—	—	—	То же
5,0—7,0	—	—	—	—	»
—	—	1,5	0.05	0.04	Автоматическая электродуговая и электрошлаковая сварка сталей с большим запасом аустенитности чисто аустенитными швами
17,0—25.0	—	1,0	0.05	0,02	Автоматическая электродуговая сварка сталей с большим запасом аустенитности чисто аустенитными швами
—	—	—	0,10	—	Электрошлаковая сварка сталей с большим запасом аустенитности чисто аустенитными швами
—	—	—	—	—	То же
—	—	—	—	—	»
—	—	—	—	—	Глубокоаустенитные швы
—	—	—	—	—	То же
—	8—12B_2O_3	—	—	—	
—	—	—	—	—	Автоматическая сварка сталей
—	4—8K_2O; 9—13MnO	—	—	—	То же, швы, не содержащие Ti, Al, B
5,0NaF	8,0KCl	—	—	—	Автоматическая электродуговая сварка сталей с большим запасом аустенитности чисто аустенитными швами
4,8	7,7KCl Силикат натрия (сухой остаток) 3,4	—	—	—	То же
—	—	—	—	—	Автоматическая сварка
(1,5—2,0) Na_2O	3,6—3,9SiO_2	—	—	—	То же, аустенитно-ферритные швы

флюса и т. д. Тем не менее, для обеспечения заданной концентрации тех или иных элементов в металле шва в электродные покрытия вводят соответствующие легирующие добавки. Например, для обеспечения требуемого количества ферритной фазы в металле шва (1—5%) в ряде случаев приходится вводить в состав покрытия некоторое количество ферритообразующих элементов. Последнее необходимо в тех случаях, когда состав сварочной проволоки не гарантирует заданного количества δ-феррита в литом металле.

Аустенитные стали содержат ряд элементов (Al, Ti, Nb, V, Cr и др.), обладающих значительно бо́льшим химическим сродством к кислороду, нежели железо, поэтому в процессе сварки возможно их выгорание, если в зоне плавления имеется окислительная среда.

Для сварки аустенитных сталей применяют [20] низкокремнистые, фтористые, высокоосновные флюсы (табл. 5).

Применение керамических флюсов для сварки жаропрочных сталей, как указывалось выше, нежелательно. Однако в ряде случаев флюсы типа ФЦК, шлакообразующей основой которых являются хлористые и фтористые соединения щелочных и щелочноземельных элементов, а также ХПК-66 и К-8 (табл. 5), дают удовлетворительные результаты.

Принципы выбора присадочного металла (электродная проволока, пластинчатый электрод) при электрошлаковой сварке мало чем отличаются от изложенных выше для электродуговой сварки. Следует отметить, что электрошлаковые швы в меньшей степени чувствительны к образованию горячих трещин и поэтому при электрошлаковой сварке предоставляются большие возможности выполнять соединения на глубокоаустенитных сталях швами с однофазной структурой (например, сварка сталей Х25Н20 и Х15Н35В4Т производится электродом того же химического состава, что и основной металл). Однако электрошлаковый процесс сварки оказывает значительно более глубокое воздействие на основной металл (околошовная зона), снижая его прочностные и пластические свойства и повышая склонность сварных соединений к околошовным (локальным) разрушениям в процессе термической обработки и последующей эксплуатации при повышенных температурах. Последнее обстоятельство необходимо иметь в виду при окончательном выборе того или иного метода сварки конструкций из аустенитной стали.

6. Состав аустенитного шва при сварке в различных газах стали Х18Н9Б

Защитный газ	C	Si	Mn	Ni	Cr	Nb	$\frac{Nb}{C}$
			Состав шва в %				
CO_2	0.13	0.46	0.51	8.3	18.3	0.63	4.8
Ar + 1% O_2	0.06	0.60	0.65	8.3	18.6	0.79	13.2
Ar+20% CO_2	0.10	0.56	0.62	8.3	18.5	0.79	7.9
Ar+15% CO_2 +5% O_2	0,08	0.57	0.60	8.3	18.5	0,83	10.2
			Состав проволоки				
—	0.06	0,62	0.70	8.3	18.6	0.83	13,8

При электродуговой сварке в среде защитных газов (сварка плавящимся электродом) используют аргон или гелий, а также смеси аргона и углекислого газа или же аргона и кислорода, последний понижает критический ток, при котором крупнокапельный перенос металла переходит в струйный. Кислород окисляет углерод в сварочной ванне, а углекислый газ (когда вследствие диссоциации в зоне дуги присутствует как CO_2, так и CO) науглероживает металл, если концентрация углерода в сварочной ванне менее 0,10%. Такого рода влияние CO_2 может быть несколько скомпенсировано дополнительным введением в газовую смесь кислорода (табл. 6). Сказанное должно учитываться, если к сварному сое-

динению предъявляется требование стойкости против межкристаллитной коррозии, когда в составе металла шва должно быть соблюдено отношение $\frac{Nb}{C} \geqslant 10$.

При сварке аустенитных сталей в чистом углекислом газе на шве образуется плотная пленка окислов, прочно сцепленная с металлом и трудно удалимая с его поверхности.

Инертные газы достаточно полно защищают расплавленный металл от атмосферного влияния и поэтому коэффициент перехода легирующих элементов в шов достаточно высок. Аргон, применяемый для сварки аустенитных сталей, поставляется по ГОСТу 10157—62.

При сварке аустенитных сталей неплавящимся вольфрамовым электродом иногда применяют аргон с примесью водорода (5—15%), который увеличивает напряжение на дуге, повышает ее тепловую мощность, способствуя получению более чистого от окисных включений металла [80].

СВАРКА ЖАРОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ

Основные свойства и особенности сварки

Промышленные жаропрочные аустенитные стали выпускаются как в горячедеформированном (прокат, поковки), так и в литом состояниях (табл. 7). Горячедеформированные стали в зависимости от их запаса аустенитности можно классифицировать на две группы: стали с малым запасом аустенитности $\left(\frac{\%\ Ni}{\%\ Cr} \leqslant 1\right)$ и стали с большим запасом аустенитности $\left(\frac{\%\ Ni}{\%\ Cr} > 1\right)$.

Следует отметить, что значение длительной прочности для стали каждой марки может колебаться от плавки к плавке. В табл. 7 приведены средние данные, которые могут несколько отличаться от полученных из других источников. При выборе флюсов, газов и электродов для сварки жаропрочных сталей следует руководствоваться данными, приведенными на стр. 95—107, а также в табл. 8 и 9.

Большие скорости охлаждения сварных соединений при электродуговой сварке приводят к фиксации структур, соответствующих околосолидусным температурам. Таким образом, металл сварного соединения находится в структурно неравновесном состоянии по отношению к рабочим температурам конструкции. Термическая обработка — аустенизация сварных соединений при 1050—1150° С или ниже часто сопровождается охлаждением на воздухе или же охлаждение производится с такими скоростями, которые также приводят к неравновесным структурам. Вследствие этого при эксплуатации (температура более 350—400° С) развиваются диффузионные процессы и в стали появляются новые структурные составляющие (явление термического старения), что может явиться причиной ухудшения пластических свойств металла, часто без увеличения прочности.

Наименее устойчивой с термодинамической точки зрения частью сварного соединения является шов, в котором фиксируется литое строение металла с присущей ему химической и физической неоднородностью (δ-феррит и другие структурные составляющие).

Старение жаропрочных сварных швов может проявляться в виде: 475-градусной хрупкости; выпадения карбидной фазы; образования интерметаллических соединений (σ-фаза, фаза Лавеса, γ′-фаза и др.).

При температурах ниже 350° С металл сварных швов не претерпевает каких-либо существенных структурных изменений при длительных выдержках, и свойства его остаются практически неизменными.

Выдержка в температурном интервале 350—500° С в ряде случаев приводит к существенному изменению механических свойств металла — повышению

7. Аустенитные жаропрочные стали, применяемые

Группа стали	Марка стали (заводская маркировка)	Содержание в %					
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
$\frac{\%Ni}{\%Cr} \leqslant 1$ (деформированные)	1Х18Н12Т	0,08—0,12	≤ 0,75	1,0—2,0	17,0—18,5	11,0—13,0	—
	Х16Н9М2	≤ 0,08	≤ 0,6	1,0- 1,5	15,5—17,0	8,5—10,0	1,5—2,0
	1Х14Н14В2М (ЭИ257)	≤ 0,15	≤ 0,8	≤ 0,7	13,0—15,0	13,0—15,0	0,45—0,60
	1Х16Н13М2Б (ЭИ405), (ЭИ680)	0,06—0,12	≤ 0,8	≤ 1,0	15,0—17,0	12,5—14,5	2,0—2,5
	3Х19Н9МВБТ (ЭИ572)	0,28—0,35	0,3—0,8	0,75—1,5	18,0—20,0	8,0—10,0	1,0—1,5
	1Х16Н14В2БР (ЭИ117)	0,07—0,12	≤ 0,6	1,0—2,0	15,0—18,0	13,0—15,0	-
	1Х16Н16МВ2БР (ЭП184)	0,06—0,11	≤ 0,8	≤ 0,6	15,0—17,0	15,0—17,0	0,4—0,9
$\frac{\%Ni}{\%Cr} \leqslant 1$ (литые)	1Х20Н12Т-Л	0,08—0,12	≤ 0,95	1,0—2,0	19,0—21,0	11,0—13,0	—
	1Х17Н10Г4МБ (ЭИ402М)	≤ 0,12	≤ 0,6	3,5—4,5	16,0—18,0	9,5—11,0	0,9—1,2
	1Х16Н9В4Б (ЦЖ15)	0,08—0,12	≤ 0,60	1,0—1,5	15,0—16,5	8,5—10,0	—

для изготовления сварных конструкций

Содержание в %			Термообработка	Температура испытания °С	Длительная прочность в кГ/мм²		Область применения	Источник
W	Ti	Прочие элементы			за 10 000 ч	за 100 000 ч		
—	5(%C—0.02), но не более 0,65	—	Аустенизация при 1050—1100° С	650 600 550	9,0 14,0 21,0	6,5 12,0 16,0	Трубы, поковки, лист	[8]
—	—	—	То же	650 600 550	11,0 15,0 21,0	8,0 13,0 16,0	То же	[83, 85]
2,0—2,75	—	—	Аустенизация при 1100° С	650 600 550	12,0 16,0 21,0	8,5 13,0 17,0	Трубы, поковки	[28]
—	—	0,9—1,3Nb	Аустенизация при 1050—1100° С	650 600 550	13,0 20,0 30,0	9,5 15,0 22,0	Поковки	[44]
1,0—1,5	0,20—0.50	0,2—0,5Nb	Аустенизация при 1150—1180°С + + стабилизация при 800° С, 15 ч	650 600 550	18,0 25,0 30,0	12,0 20,0 27,0	»	[44]
2,0—2,75	—	0.9—1,3Nb; 0,005B	Аустенизация при 1150° С	700 660	14,0 18,0	10,0 17,0	Трубы, поковки	[91]
2,0—3,0	—	0,6—0,9Nb; 0,005B	То же	700 660 650	18,0	15,0	Трубы	[47]
—	5 (%C—0.02), но не более 0,7	—	»	600	15,0	13,0	Литая арматура паровых и газовых турбин	[72, 28]
—	—	0,7—1,0Nb	Аустенизация при 1170° С, отпуск 750° С, 15 ч	700 650		7,0 10,0	То же	[19, 27]
3,0—4,0	—	$\frac{\text{Nb}}{8 \times \%\,\text{C}}$ но $\leqslant 1{,}20$	Аустенизация при 1100–1150° С, стабилизация 800° С, 10 ч	650	13,5	11,0		[70, 75]

Группа стали	Марка стали (заводская маркировка)	Содержание в %					
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
$\frac{\%Ni}{\%Cr} > 1$ (деформированные)	1Х14Н18В2БР (ЭИ695Р)	0,07—0,12	≤ 0,6	1,0—2,0	13,0—15,0	18,0—20,0	—
	1Х15Н25М6А (ЭИ395)	≤ 0,12	0,5—1,0	1,0—2,0	15,0—17,5	24,0—27,0	5,5—7,0
	Х15Н35ВТ (ЭИ612)	≤ 0,12	≤ 0,50	1,0—2,0	14,0—16,0	34,0—38,0	—
	Х15Н35ВТР (ЭИ725)	≤ 0,12	≤ 0,60	≤ 1,0	14,0—16,0	35,0—38,0	—

Примечание. Стали 1Х20Н12ТЛ, 1Х17Н10Г4МБ и 1Х16Н9В4Б выплавляют

прочности и уменьшению пластичности и, особенно, ударной вязкости (475-градусная хрупкость). Это явление наблюдается в аустенитно-ферритных сварных швах в тех случаях, когда количество феррита в них превышает 6—7%. Длительная выдержка аустенитно-ферритных швов при 500—650° С приводит к старению в основном за счет выпадения карбидов и образования σ-фазы. Преобладающую роль в охрупчивании металла типа 1Х19Н10Б при 650° С и выдержках до 5000 ч играет карбидная фаза. Однако при 700 и 750° С, а также в аустенитно-ферритном наплавленном металле более сложного состава участие σ-фазы в охрупчивании существенно возрастает. Роль σ-фазы возрастает с повышением концентрации хрома, молибдена, вольфрама и других элементов, входящих в ее состав или способствующих ее образованию, с увеличением в металле ферритной фазы, а также температуры старения (в пределах до 800—850° С) и длительности выдержки (рис. 9 и 10).

Свойства чисто аустенитных сварных швов в процессе длительного теплового старения также изменяются. Однако причина этого явления заключается главным образом в образовании карбидной (карбонитридной) и интерметаллидных фаз. Роль σ-фазы при этом в большинстве случаев незначительна (рис. 11).

В табл. 10 приведены механические свойства наплавленного металла (металл шва) после старения для некоторых марок жаропрочных электродов.

Термическая обработка конструкций и локальные разрушения

Большинство сварных конструкций из аустенитных сталей подвергается последующей термической обработке — либо аустенизации при 1050—1100° С или несколько более низкой (выбор температуры определяется маркой стали и

Продолжение табл. 7

Содержание в %			Термообработка	Температура испытания в °С	Длительная прочность в кГ/мм²		Область применения	Источник
W	Ti	Прочие элементы			за 10 000 ч	за 100 000 ч		
2,0—2,75	—	1,9—1,3Nb; 0,005B	Аустенизация	700 650	12,0 17,0	9,0 13,0	Трубы, поковки	44
—	—	0,10—0,20Nb	Аустенизация при 1180° С + + стабилизация при 700° С, 50 ч	650 600	15,5 22,0	11,0 17,0	Поковки	44
2,8—3,5	1,1—1,5	—	Аустенизация при 1180° С + + стабилизация при 780° С 10 ч + + старение при 730° С, 25 ч	650 570	20,0 28,0	16,0 22,5	»	44
4,0—5,0	1,1—1,5	0,005—0,02B	Аустенизация при 1140° С, стабилизация при 750° С, 24 ч	750 700 650	11,0 15,0 20,0	8,0 12,0 16,0	Лист	44

с регламентированным количеством феррита.

типом конструкции), либо аустенизации с последующим стабилизирующим отжигом при 750—800° С. Аустенизация предназначена для снятия остаточных (сварочных) напряжений, а также эффекта самонаклепа и придания сварному соединению более однородных свойств. Стабилизация создает относительную стабильность структуры металла за счет выпадения избыточных фаз из твердого раствора. Термическая обработка (аустенизация и стабилизация) имеет важное значение и с точки зрения придания конструкции стабильной геометрии при высоких температурах, когда возможно перераспределение остаточных напряжений, часто сопровождаемое формоизменением изделия.

Термическая обработка для снятия сварочных напряжений в конструкциях из аустенитных сталей может быть местной или же общей в зависимости от их конфигурации (геометрии). Так, например, для монтажных стыков аустенитных паропроводов, когда возможно под влиянием нагрева относительно свободное расширение материала вдоль оси трубы, применима местная термическая обработка только в районе сварного шва на участке, равном двум-трем диаметрам трубы.

Другим не менее важным последствием термической обработки является снижение вероятности развития локальных околошовных разрушений (см. ниже). Последние могут возникнуть в процессе эксплуатации изделия при высоких температурах под влиянием сочетания высокого уровня остаточных и рабочих напряжений, вызванных теми или иными условиями эксплуатации конструкции.

Локальные околошовные разрушения могут возникнуть и в процессе термической обработки, если нагрев в зоне «опасных» температур (600—800° С)

8. Некоторые марки проволок для

Марка стали (заводская маркировка)	Содержание						
	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P
						не более	
Х17Н9 (ЭП366)	0,05—0,10	1,5—2,0	0,6	16,0—18,0	8,0—9,5	0,025	0,030
Х18Н9Б (ЭП307)	0,05—0,10	1,8—2,3	0,3—0,7	17,5—19,5	8,0—9,5	0,018	0,025
Х16Н8М2 (ЭП290)	0.04—0.08	1,0—2,0	0,6	14,0—15,5	7,5—9,0	0,025	0,03
Х16Н8М2 (ЭИ377)	0,05—0,10	1,5—2,0	≤0,6	15,0—17,0	7,5—9,0	0,025	0,030
Св-04Х19Н11М3	Не более 0,06	1,0—2,0	0,6	18,0—20,0	10,0—12,0	0,018	0,025
Х15Н9В4Б (ЭП306)	0,05—0,10	1,8—2,3	0,3—0,7	14,5—16,5	8,0—9,5	0,018	0,025
Х16Н14Г7В3Б2	0,10—0,15	6,5—8,0	0,6	15,0—17,0	13,0—15,0	0,020	0,025
Св-10Х16Н25М6	0,08—0,12	1,0—1,2	0,6	15,0—17,5	24,0—27,0	0,018	0,025
1Х14Н20В2Б2 (ЭП45)	0,15—0,19	1,0—2,0	≤0,45	13,0—15,0	18,0—24,0	0,02	0,03
Св-30Х15Н35В3Б3Т	0,26—0,32	0,5—1,0	0,20	14,0—16,0	34,0—36,0	0,015	0,025
6Х15Н35Г7В7М3Т (ЭП235)	Не более 0,08	7,0—8,5	0,35	14,0—16,0	34,0—36,0	0,020	0,020

Примечание. Применяют также проволоки марок Св-02Х19Н9 и Св-08Х19Н10Б.

сварки аустенитных жаропрочных сталей

элементов в %	Назначение	ГОСТ или ТУ
Прочие элементы		
—	Электроды типа ЭА-1 и ЭА-1а (ГОСТ 10052—62*) марки ОЗЛ-8 и др. Рекомендуется преимущественно для механизированных методов сварки аустенитно-ферритными швами сталей типа Х18Н9	ЧМТУ/ЦНИИЧМ 645—62 Сталь выплавляется с регламентированным содержанием ферритной фазы 3—6%
1,2—1,5Nb	Электроды типа ЭА-1Б, ЭА-1Ба марки ЦТ-15, ЦТ-16 и др. Рекомендуется для механизированных методов сварки аустенитно-ферритными швами сталей типа Х18Н9Б, Х18Н12Т и др.	ЧМТУ/ЦНИИЧМ 519—61 Сталь выплавляется с регламентированным содержанием ферритной фазы 4—6%
1,0—2,0Mo	Электроды ЦТ-26	ЧМТУ/ЦНИИЧМ 454—61
1,5—2,0Mo	То же Рекомендуется преимущественно для механизированных методов сварки стали Х16Н9М2	ЧМТУ/ЦНИИЧМ 651—62 Сталь выплавляется с регламентированным содержанием ферритной фазы 3—6%
2,0—3,0Mo	Электроды типа ЭА-1М2Ф, ЭА-1М2Фа марки ЦТ-7 и др., а также для механизированных методов сварки жаропрочных сталей типа Х18Н11М2 и др.	ГОСТ 2246—60
1,2—1,5Nb; 3,5—4,0W	Электроды марки ЦТ-25	ЧМТУ/ЦНИИЧМ 519—61 Сталь выплавляется с регламентированным содержанием ферритной фазы 4—6%
1,8—2,4Nb, 2,0—3,0W	Электроды марки ЦТ-23	ЧМТУ/ЦНИИЧМ 948 -63
5,5—7,0Mo	Электроды ЭА-3М6, ЭА-3М9 марки ЦТ-10, ЦТ-10-1 (ГОСТ 10052—62*) и др., а также для механизированных методов сварки	ГОСТ 2246—60*
0,02Ce по расчету; 1,5—1,9Nb; 2,0—2,75W	Электроды АЖ-13-18	ЧМТУ/ЦНИИЧМ 893—63
2,80—3,30Nb; 0,6—1,0Ti; 2,5—3,0W	Электроды типа ЭА-4В3Б2 (ГОСТ (10052—62*) марки КТИ-7 и КТИ-8	ГОСТ 2246—60 Может быть заменена проволоками ЭИ-36 (ЧМТУ/4572—54) или ЭИ-19 (ЧМТУ/ЦНИИЧМ 338—60) при условии содержания в них кремния не более 0,3%
3,0—4,0Mo, 1,3—1,8Ti; 7,0—8,5W	Электроды ЦТ-22, а также для автоматической и полуавтоматической сварки под флюсом и электрошлаковой сварки сталей типа Х15Н35В3Т	ЧМТУ/ЦНИИЧМ 400—61

9. Некоторые марки электродов для сварки аустенитных жаропрочных сталей

Тип наплавленного металла	Рекомендуемая марка электрода	Марка сталей, для которых предназначен электрод	Температура испытаний в °С	Длительная прочность наплавленного металла в кГ/мм²		Структура наплавленного металла	Источник
				за 10 000 ч	за 100 000 ч		
Х16Н9М2	ЦТ-26	1Х18Н9, 1Х18Н9Т, 1Х18Н12Т, Х16Н9М2	550 600 650	20,0 17,0 11,0	16,0 14,0 8,0	Аустенит + феррит (2—4%)	Данные К. В. Любавского, Ю. М. Никитина и М. М. Тимофеева
Х18Н11М2Ф	ЦТ-7 КТИ-5	Х16Н13М2Б (ЭИ405, ЭИ680)	650 600	13,0 —	9,0 16,0	Аустенит + феррит (3—5%)	[31]
1Х20Н10МВФБ	ЦТ-5	3Х19Н10МВБ (ЭИ572)	600	25,0	22,0	То же	[89]
Х18Н10В2Б	ЦТ-16	1Х16Н14В2БР (ЭИ17)	660 700	17,0 13,0	13,0 9,0	»	—
1Х16Н9В4Б	ЦТ-25	1Х16Н9В3Б (ЦЖ15)	650	16,0	13,0	Аустенит + феррит (2—4%)	[70]
1Х15Н4Г6В2Б	ЦТ-23	1Х16Н16В2БР (ЭИ184), 1Х14Н20В2БР (ЭИ695Р)	660	13,0	10,0	Аустенит + карбиды	[25]
1Х15Н25М6	ЦТ-10	1Х15Н25М6А (ЭИ395)	650	15,0	12,0	То же	[88]
1Х14Н18В2Б	АЖ-13-18	1Х14Н20В2БР (ЭИ695Р)	650	18,0	13,0	»	[74]
3Х13Н35В3Б2	КТИ-7	1Х15Н35В3Т2 (ЭИ612)	650 760	20,0 16,0	18,0 13,0	»	[23]
Х16Н35Г6М3В7ТЮ	ЦТ-22	Х15Н35В3Т (ЭИ725), Х15Н25В3Т (ЭИ164) и др.	800	4,0	—	Аустенит + карбиды и интерметаллические соединения	41

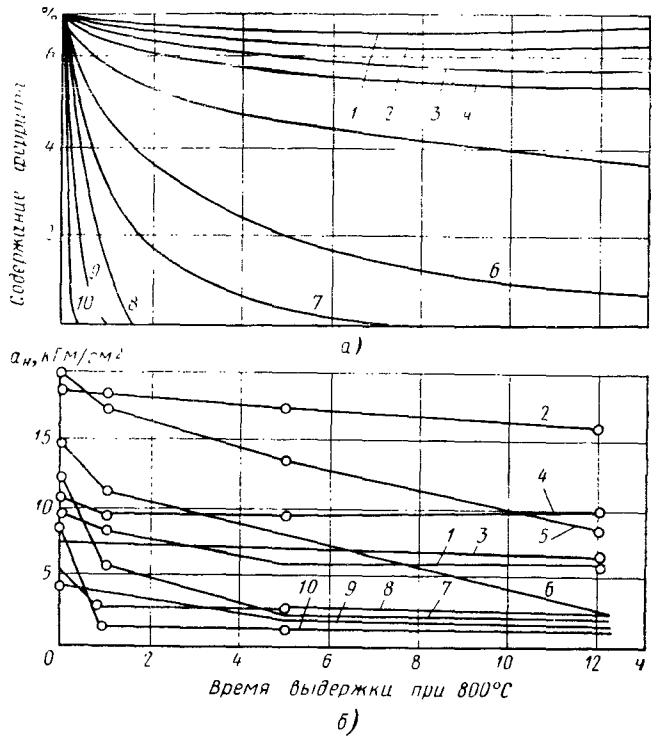


Рис. 9. Изменение ударной вязкости литого (или наплавленного) металла различного типа легирования в связи с сигматизацией феррита в процессе стабилизирующей термообработки. Исходное количество ферритной фазы во всех случаях 5—7% [70]: *1* — 1Х16Н9В4Б; *2* — 1Х18Н9Т; *3* — 1Х15Н9С3Б; *4* — 1Х19Н10Б; *5* — 1Х20Н12Т(0,5%Si); *6* — 1Х20Н12Т(1%Si); *7* — 1Х22Н13Б; *8* — 1Х19Н13С3Б; *9* — 1Х19Н13В6БФ; *10* — 1Х20Н12М2С3ВТ;

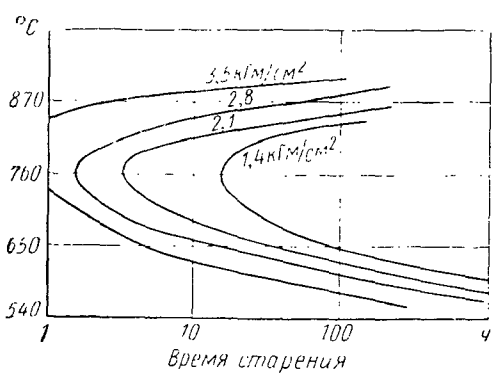


Рис. 10. Влияние температуры и времени старения на ударную вязкость (по Шарпи) наплавленного металла [39] типа Х18Н9Б. Испытание при комнатной температуре

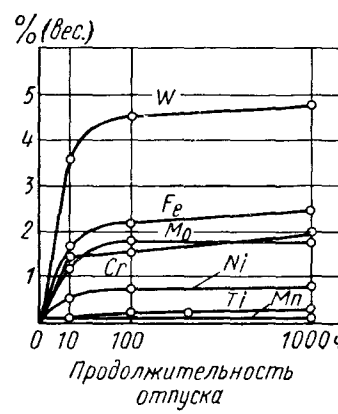


Рис. 11. Изменение содержания элементов в анодном осадке наплавленного металла типа 08Х16Н35Г6В7М3ТЮ в зависимости от продолжительности отпуска при температуре 800° С

10. Кратковременные механические свойства наплавленного металла (металл шва) (испытания при ком

Тип наплавленного металла	Марка электрода	Металл	Состояние металла	Температура старения в °С	Меха
					Без
					$\sigma_{0,2}$ в кГ/мм²
Х18Н9Б	ЦТ-15	Наплавленный, содержание феррита 3,5%	Исходное (после сварки)	600 650	42 42
			Аустенизация 1050° С, 1 ч	600 650	36 36
Х16Н8М2	ЦТ-26	Наплавленный, содержание феррита 2,5%	Исходное состояние (после сварки)	650	42
			Аустенизация 1100° С, 1 ч	650	27
1Х18Н11М2Ф	ЦТ-7	Шва, содержание феррита 2%	Исходное состояние (после сварки)	600	36
		Шва, содержание феррита 4,5%	Отпуск 800° С, 10 ч	600 600 650	45 — —
1Х20Н10МВФБ	ЦТ-5	Шва, содержание феррита 3,5%	Отпуск 800° С, 10 ч	600 650	42 42
1Х18Н10В2Б	ЦТ-16	Наплавленный, содержание феррита 3,8%	Исходное состояние (после сварки)	700	38
			Аустенизация 1100° С, 2 ч	700	31
1Х16Н4Г7В2Б	ЦТ-23	Наплавленный	Исходное состояние (после сварки)	700	35
			Аустенизация 1100° С, 1 ч	700	35
1Х15Н25М6	ЦТ-10	»	Отпуск 800° С, 10 ч	650	35
			Отпуск 800° С, 10 ч	750	35
1Х14Н18В2Б	АЖ-13-18	Шва	Исходное состояние (после сварки)	650	38
3Х13Н35В3Б2	КТИ-7		Исходное состояние (после сварки)	600 650	— 50
08Х16Н35Г6В7М3ТЮ	ЦТ-22	Наплавленный	Аустенизация 1120° С	800	45***

* Выдержка 1000 ч. ** Выдержка 2000 ч. *** Выдержка 10 ч

промышленных марок жаропрочных электродов после теплового старения натной температуре)

ические свойства металла после выдержки в ч													Источник
выдержки		500			3000			5000			10 000		
δ_5 в %	$a_н$ в кГм/см²	$\sigma_{0,2}$ в кГ/мм²	δ_5 в %	$a_н$ в кГм/см²	$\sigma_{0,2}$ в кГ/мм²	δ_5 в %	$a_н$ в кГм/см²	$\sigma_{0,2}$ в кГ/мм²	δ_5 в %	$a_н$ в кГм/см²	$\sigma_{0,2}$ в кГ/мм²	δ_5 в %	$a_н$ в кГм/см²	
44 44	12 12	44 43	37 34	10 8	45 42	40 36	8 6	46 40	36 32	8 6	- 37	— 31	— 4	Данные К. В. Любавского и Б. И. Лазарева
42 42	14 14	38 37	40 46	13 13	37 34	44 46	12 11	— 34	— 41	— 11	— —	- —	- —	
47	14	33*	38*	8*	31	35	-	33	34	—	29	32	12	Данные М. М. Тимофеева и П. И. Чешева
78	—	29*	52*	14*	-	—	—	—	—	—	24	39	-	
41	17	44	24	10	33	34	9	-		—	-	—	-	[31]
30 — —	14 7 7	43 —	28 —	9 -	39 —	28 -	9 7 5	—	—	6 4	—	—	—	
42 42	11 11	— —	— —	- 10*	— —	— —	—	40 39	42 38	9 9	- -	— —	9 —	Данные В. А Торопова
44	12	35*	29*	7*	37	20	1,5	45	12	2	—	—	—	Данные Б. И. Лазарева и И. Н. Русиновой
46	16	31*	45*	11*	31	40	7	31	35	6		—	—	
30	10	40*	29*	7*	30	29	6	29	28	6	-	—	—	[25]
38	10	32*	30*	8*	30	36	7	28	30	7	—	-	-	
30	7	39	26	6	39	21	4	—	—	-	—	—	—	[88]
30	7	39	21	6	35**	18**	5*	-	—	—	—	—	—	
25	9	—	—		-	-	7*		—		-	—	—	[74]
— 25	— 8	— —	— —	6 6	-	— —	4 4	— —	— —	— —	— —	— —	— —	[23]
30***	7***	60	23	1,5	58*	23*	1,5	—	—	—	—	—	—	[32]

происходит с недостаточной скоростью или если производится местная термическая обработка, в процессе которой возникают значительные реактивные напряжения.

Аустенитные стали ряда марок в результате воздействия термического цикла сварки снижают свои прочностные и пластические свойства в околошовной зоне. Поэтому околошовная зона и является местом (очагом) возникновения локальных разрушений [88], которые проявляются в виде трещин, образующихся в основном металле параллельно линии сплавления (рис. 12) на расстоянии одного — трех зерен от нее. Трещины располагаются по границам зерен, а разрушения сварных соединений происходят с малой деформацией металла и имеют хрупкий характер



Рис. 12. Локальные разрушения сварных соединений на стали 1Х18Н12Т Слева — металл шва; справа — околошовная зона. Стрелкой указана околошовная трещина

[17, 34, 114, 115, 116]. Основными причинами локальных разрушений являются следующие [35, 37, 84]:

1. Ухудшение механических свойств основного металла в околошовной зоне, связанное с протеканием вблизи линии сплавления явлений двух типов:

а) развития диффузионных процессов, приводящих при сварочном нагреве (высокотемпературная часть термического цикла сварки) к повышению концентрации поверхностно активных элементов на границах зерен. Для поверхностно активных элементов высокая их концентрация вблизи поверхности зерна может быть получена при очень малой объемной концентрации. Поэтому присутствие в сплаве даже небольших количеств таких элементов, как углерод, кислород и др., может привести к возникновению значительных их концентраций на границах зерен [4] в случае воздействия на него термического цикла сварки.

Соединения некоторых из указанных элементов могут образовывать, в особенности совместно с вредными примесями, по границам зерен эвтектики, температура плавления которых находится ниже температуры плавления металлической основы сплава. Это приводит к ослаблению границ зерен, что ухудшает

механические свойства металла и может привести, под воздействием термодеформационного цикла сварки, к образованию в околошовной зоне макротрещин;

б) выделения во время длительной эксплуатации при температурах 500—800° С мелкодисперсных карбидов титана и ниобия в теле зерна, упрочняющих его, и дальнейшее развитие процессов, ослабляющих границы зерен (образование σ-фазы, выделение и коагуляция карбидов, интерметаллидов и т. п.). В результате этих процессов существенно снижается общая деформационная способность (пластичность) металла околошовной зоны сварных соединений и локализация пластических деформаций по границам зерен, что создает благоприятные условия для возникновения межзеренных разрушений.

2. Высокий уровень действительных напряжений в зоне сварных соединений, слагающийся в общем случае из остаточных сварочных напряжений, компенсационных, рабочих, а также напряжений от теплосмен.

3. Неоднородность механических свойств различных зон сварного соединения (шов, околошовная зона и основной металл вдали от шва). При сварке аустенитных сталей, во избежание возникновения горячих трещин в швах, часто вынуждены применять электроды, обеспечивающие двухфазную аустенитно-ферритную структуру металла, состав которого значительно отличается от химического состава основного материала. Это приводит в процессе эксплуатации сварных соединений к значительному упрочнению металла шва из-за выделения в нем σ-фазы, а также карбидов. Повышенные прочностные характеристики металла шва по сравнению с таковыми основного металла приводят к локализации деформаций в околошовной зоне, имеющей пониженный запас пластичности, и межкристаллитному разрушению сварного соединения. Локальные разрушения могут возникать также под воздействием только сварочных напряжений. В этом случае сочетание высоких сварочных напряжений и пониженной прочности и пластичности основного металла вблизи линии сплавления приводит к исчерпанию предела длительной прочности металла в указанной зоне сварного соединения.

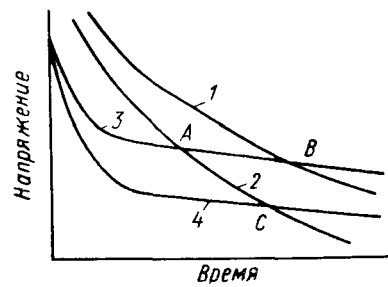


Рис. 13. Кривые длительной прочности и релаксации напряжений в сварных соединениях при различных условиях их выполнения и эксплуатации (схема): *1*, *2* — кривые длительной прочности сварного соединения; *3*, *4* — кривые релаксации сварочных напряжений в сварных соединениях

На рис. 13 приведены возможные варианты кривых длительной прочности и релаксации сварочных напряжений для аустенитных жаропрочных сталей. Точки (*A*, *B*, *C*) пересечения указанных кривых показывают время существования сварного соединения до его разрушения под воздействием сварочных напряжений (его живучесть).

Повышение уровня остаточных напряжений в сварном соединении (например, за счет увеличения его жесткости) уменьшает его живучесть; поэтому целесообразно использовать для сварки электроды, обеспечивающие возможно более пластичный металл шва (точки *A*, *C* пересечения кривых *3* и *4* кривой *2*). Более высокая длительная прочность основного металла при прочих равных условиях увеличивает стойкость сварных соединений против саморазрушений (рис. 14).

Методы предотвращения локальных разрушений сварных соединений аустенитных сталей состоят в исключении или ослаблении воздействия факторов, их вызывающих. Высокотемпературная термическая обработка (аустенизация) при 1050—1100° С позволяет практически полностью снять сварочные напряжения (90—95%) и эффект самонаклепа. Возможен отпуск и при более низких температурах. Однако отпуск при температурах ниже 850—900° С не рекомендуется, так как в этом случае в процессе выдержки снижаются пластические свойства

металла (выпадение карбидов, образование σ-фазы, интерметаллидов и др.), что, в сочетании с более медленной релаксацией сварочных напряжений, может вызвать саморазрушение сварных соединений. Очень большое значение имеет скорость нагрева (рис. 14). При больших скоростях нагрева кривая *1* проходит вне области саморазрушения и растрескивания конструкции не имеют места. Саморазрушение под влиянием сварочных напряжений при температуре до 500—550° С и относительно небольшом времени выдержки обычно не наблюдается. Поэтому в целях выравнивания температур по толщине материала при термической обработке крупных толстостенных сварных конструкций целесообразно делать при 500—550° С температурную остановку. Режим охлаждения после аустенизирующей выдержки выбирают таким образом, чтобы в сварной конструкции не возникли напряжения, вызванные неравномерной по толщине стенок температурой (около 25—30° С/ч). В ряде случаев сварные конструкции проходят после аустенизации стабилизирующий отпуск при 750—800° С. Часто его осуществляют как вторую стадию термической обработки непосредственно после первой ее стадии — аустенизации.

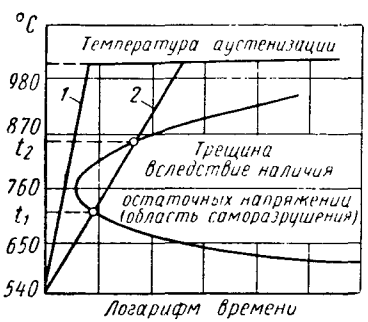


Рис. 14. Зависимость между временем до разрушения сварных соединений, находящихся под воздействием остаточных напряжений, и изменением температуры. Возможные режимы аустенизации сварных соединений: *1* — быстрый нагрев; *2* — медленный нагрев (возможно саморазрушение соединения в интервале температур t_1 — t_2)

В тех случаях, когда по каким-либо условиям высокотемпературную термическую обработку выполнить невозможно (например, при ремонтных работах и монтаже крупных деталей — коллекторов, тройников и т. п.), предварительный и сопутствующий подогрев до 350—450° С дает возможность получить в сварном соединении более равномерное распределение напряжений, что несколько уменьшает опасность возникновения в них локальных разрушений.

Вопрос чистоты основного металла имеет первостепенное значение. Это, в особенности, относится к глубокоаустенитным сталям. Так, стали некоторых марок, выплавленные на чистой шихте и дополнительно подвергнутые электрошлаковому переплаву или же выплавленные вакуумным методом, не проявляли заметной склонности к околошовным разрушениям, несмотря на то, что обычная плавка на рядовой шихте приводила к склонности этих же сталей к околошовным разрушениям.

Известно также, что при большом количестве легкоплавкой фазы (эвтектики) в сварных швах склонность их к образованию трещин уменьшается. Это обстоятельство было использовано при разработке боридных сталей (0,3—1,5% B) [56], которые, благодаря высокой концентрации бора имеют значительное количество относительно легкоплавкой боридной фазы, «залечивающей» возникающие при сварке в околошовной зоне трещины.

Весьма надежным средством предотвращения локальных разрушений в сварных швах является получение в них двухфазной структуры — аустенит плюс 2,0—5,0% ферритной фазы в исходной структуре слитка. При последующей горячей пластической деформации (ковка, прокатка) и аустенизации ферритная фаза растворяется, и металл приобретает чисто аустенитную структуру. При сварке в околошовной зоне происходит нагрев до температур устойчивого существования δ-фазы (1250—1400° С), вследствие чего имеет место выпадение ферритной фазы (δ-феррит), и сталь приобретает двухфазную структуру. В более сложных по химическому составу аустенитных сталях благотворное влияние ферритной фазы проявляется еще более отчетливо.

Для снижения вероятности локальных разрушений в сварных соединениях в тех случаях, где это возможно, следует вместо легирования титаном и ниобием вводить в сталь молибден. Молибден, являясь поверхностно активным элементом в стали, распределяется в основном по границам зерен и в меньшей степени по телу зерна. В результате этого границы зерен упрочняются, что обеспечивает высокую пластичность стали при удовлетворительных кратковременных и длительных прочностных свойствах. Весьма целесообразен по возможности более низкий уровень легирования стали хромом, так как это резко снижает опасность ее сигматизации. На этих основах разработана сталь Х16Н9М2, предназначенная для изготовления сварных энергетических конструкций [83, 85]. Эта сталь имеет малую чувствительность к термическому циклу сварки, не склонна к локальным разрушениям.

Следует отметить, что за последние 5—7 лет аустенитные стали, легированные молибденом, начали широко применяться за рубежом для изготовления паропроводов электростанций, работающих при 565—650° (так, например, в США применяется сталь 316). По имеющимся в литературе данным, работоспособность сварных соединений при этом существенно повысилась.

СВАРКА КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ

Основные свойства и особенности сварки

Основные свойства. В качестве коррозионностойких материалов широко применяются хромоникелевые аустенитные стали. Находят также применение хромомарганцовые аустенитные, хромоникелевые аустенитно-ферритные, аустенитно-мартенситные и аустенитно-боридные стали (табл. 11). Подробные сведения о коррозионностойких сталях (химический состав, прочностные свойства, примерное назначение, коррозионная стойкость и др.) см. в работах [4, 10, 20, 29, 52, 53, 81, 90] и ГОСТе 5632—61*

Оценку коррозионной стойкости металлов (сталей, сплавов, сварных швов) по потере массы (в $г/м^2 \cdot ч$) производят по пятибалльной шкале, по глубинному показателю (скорость коррозии в *мм/год*) — по десятибалльной шкале по ГОСТу 13819—68 (табл. 12).

При производстве изделий, конструкций и оборудования из коррозионностойких аустенитных сталей применяют преимущественно ручную и механизированную (под флюсом в среде защитных газов) электродуговую сварку, для особо ответственных изделий наряду с дуговой используют электроннолучевую, диффузионную, плазменную и другие виды сварки. Аустенитные стали большой толщины сваривают электрошлаковым способом.

Газовая сварка и сварка угольным электродом не рекомендуется ввиду ряда существенных недостатков и прежде всего опасности науглероживания металла шва и околошовной зоны.

Марку стали и технологию сварки выбирают в зависимости от условий, в которых будет работать изделие. Например, когда сталь используется в качестве коррозионностойкой, главным требованием, которому должно удовлетворять сварное соединение, является стойкость металла шва и околошовной зоны против межкристаллитной и общей жидкостной коррозии, а также сопротивляемость коррозионному растрескиванию.

Если же из стали изготовляют аппаратуру для кислородных станций или емкости для хранения и транспортировки сжиженных газов (кислорода, азота, водорода), важнейшим условием работоспособности сварного соединения является высокая пластичность (ударная вязкость) металла шва при низких температурах, вплоть до —250° С. Коррозионная стойкость шва в данном случае — факультативное требование. Когда сталь идет на изделия, работающие при совместном воздействии повышенных температур и коррозионной среды, важно, чтобы сварное соединение наряду с требуемой коррозионной стойкостью не было

11. Химический состав типичных коррозионностойких аустенитных сталей

Тип стали	Марка стали	Содержание элементов в %							
		C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Другие элементы
		не более							
		Аустенитные хромоникелевые стали							
18-10	0Х18Н10 (0Х18Н9)	0.08	0.80	1,0—2,0	0,020	0,035	17,0—19.0	9.0—11,0	—
	Х18Н10Т (1Х18Н9Т)	0.12	0.80	1.0—2.0	0,020	0,035	17.0—19.0	9.0—11,0	(% C—0.02)×5 ≤ 0.70Ti
18-12	0Х18Н12Т	0.08	0,80	1,0—2,0	0,020	0.035	17,0—19,0	11.0—13,0	5×C ≤ 0,60Ti
	Х17Н13М2Т (Х18Н12М2Т)	0,10	0.80	1,0—2,0	0,020	0,035	16,0—18.0	12,0—14,0	1,8—2.5Mo; 0,3—0,6Ti
25-20	0Х23Н18	0,10	1,0	2,0	0.020	0,035	22,0—25,0	17.0—20.0	—
23-28	0Х23Н28М3Д3Т (ЭИ943)	0.06	0.80	0,80	0,020	0.035	22,0—25,0	26.0—29,0	2.5—3,0Mo; 0,4—0,7Ti
		Аустенитные хромомарганцовые стали							
—	Х14Г14Н3Т (ЭИ711)	0,10	0,80	13,0—15,0	0,020	0,035	13,0—15,0	2,5—3,5	(%C—0,02)×5 ≤ 0.6Ti
		Аустенитно-ферритные стали							
21-5	0Х21Н5Т (ЭП53)	0.08	0.80	0.80	0.025	0.035	20,0—22,0	4,8—5.8	0.30—0.60Ti
	0Х21Н6М2Т (ЭП54)	0.08	0,80	0,80	0,025	0,035	20,0—22.0	5,5—6.5	1,80—2.50Mo; 0.20—0.40Ti
		Аустенитно-мартенситные стали							
17-7	Х17Н7Ю (ЭИ973)	0,09	0,80	0.80	0,025	0,035	16.0—18,0	6.5—7,5	0,80—1.30Al
		Аустенитно-боридные стали							
18-12	Х18Н12БР1 (ЭП381)	0.08	0.80	1.0—2,0	0.025	0.030	17,0—19,0	11.0—13.0	% C×8 ≤ 1.2Nb; 0.50—0,80B

подвержено охрупчиванию в процессе длительной эксплуатации. В ряде случаев важным требованием является способность металла противостоять разрушающему действию горячих газов. Помимо перечисленных требований, к сварным соединениям всегда предъявляются обычные для сварки требования. Следует помнить, что дефекты в швах и сталях являются потенциальными очагами коррозионного разрушения. Поэтому чем чище сталь и металл шва, тем выше сопротивляемость их коррозии.

12. Классификация коррозионной стойкости металлов по пятибалльной и десятибалльной шкалам

Пятибалльная шкала		Балл	Десятибалльная шкала	
Группа стойкости	Потери массы в *г/м²·ч*		Группа стойкости	Скорость коррозии в *мм/год*
Весьма стойкий	<0.10	1	Совершенно стойкий	<0.001
Стойкий	0.10–1.0	2	Весьма стойкий	0.001–0.005
Сравнительно стойкий	1.0–3,0	3		0.005–0.01
Малостойкий	3,0–10.0	4	Стойкий	0.01–0,05
Нестойкий	>10.0	5		0.05–0.10
		6 7	Пониженно стойкий	0.10–0.50 0.50–1.0
		8 9	Малостойкий	1.0–5,0 5,0–10.0
		10	Нестойкий	>10.0

Коррозионная стойкость мелкозернистых сталей и сварных швов выше, чем крупнозернистых. По этой причине деформированные стали превосходят литые, швы с мелкой структурой, например дуговые, превосходят крупнокристаллитные, электрошлаковые.

Основные виды коррозии сварных соединений. Аустенитные стали и сварные швы подвержены нескольким видам коррозионного разрушения, главными из которых являются: межкристаллитная (МКК), общая жидкостная и коррозионное растрескивание [20, 24, 52, 81, 90]. Межкристаллитная коррозия наблюдается при выдержке стали или сварных швов при температурах 500—800° С или при медленном охлаждении их с 900—1000° С. В процессе сварки участки металла в околошовной зоне подвергаются тепловому воздействию в области указанных температур и там может развиваться межкристаллитная коррозия.

Применяют следующие методы предупреждения МКК:

1) снижают содержание углерода в стали и швах до пределов растворимости 0,02—0,03% [стали 000Х18Н10 (ЭП550), 00Х25Н20 (ЭП 554)];

2) легируют сталь (швы) элементами: титаном, ниобием, танталом, цирконием, ванадием, обладающими бо́льшим сродством к углероду, чем хром [проволоки Св-06Х19Н9Т, Св-08Х19Н10Б, электроды ОЗЛ-17 (0Х23Н28М3Д3Б)];

3) подвергают сварные соединения закалке с 1050—1100° С (обязательным является быстрое охлаждение) или стабилизирующему отжигу в течение 2—4 ч при 850—900° С;

4) повышают в швах содержание феррита до 20—25% путем дополнительного легирования их хромом и такими элементами, как кремний, алюминий, ванадий, молибден, вольфрам (проволока Св-05Х19Н9ФЗС2).

Ножевая коррозия является разновидностью межкристаллитной. Она возникает на узкой полосе вдоль шва непосредственно у линии сплавления. Обязательным условием появления этого вида коррозии является перегрев стали в околошовной зоне до температур более 1200—1250° С и повторное тепловое воздействие на этот участок критических температур 500—800° С.

Меры предупреждения ножевой коррозии:

1) снижение содержания в стали и швах углерода до 0,02—0,03%;

2) легирование стали и швов стабилизирующими элементами — титаном, ниобием $\left(\frac{Ti}{C} > 5 \text{ и } \frac{Nb}{C} > 10\right)$;

3) применение ряда технологических приемов, направленных на недопущение или уменьшение перегрева металла в околошовной зоне (сварка короткой дугой на максимальных скоростях; сварка очередного валика после полного остывания предыдущего; сварка слоя, обращенного к агрессивной среде, в последнюю очередь; охлаждение сварного соединения со стороны ранее заваренного шва и др.);

4) закалка сварных соединений или стабилизирующий отжиг (см. выше).

Общая жидкостная коррозия шва или околошовной зоны возникает в результате воздействия агрессивного реагента.

С точки зрения сварщиков, основным методом борьбы с этим видом коррозии является сварка изделия швами идентичного с основным металлом состава и правильный выбор режима термической обработки.

Коррозионное растрескивание стали и сварных швов образуется в результате совместного воздействия растягивающих напряжений и агрессивных реагентов, в частности, хлоридосодержащих сред, морской воды, бидистиллата, некоторых кислот и т. д. Коррозионному растрескиванию подвержены преимущественно стабильноаустенитные стали, например, Х18Н10Т, 0Х23Н18 и др.

Меры борьбы с коррозионным растрескиванием аустенитных сталей и сварных швов:

1) повышение в них содержания никеля более 40% [сплавы типа Х20Н40 (ЭП337) и др.];

2) создание двухфазной структуры; аустенитно-ферритной, аустенитно-боридной [содержание бора не менее 0,5—0,8%, сталь Х18Н12БР1 (ЭП381) и др.];

3) недопущение коробления и наклепа сварного изделия, которые способствуют возникновению растягивающих напряжений в отдельных объемах металла.

Технологические особенности сварки. При сварке нельзя допускать перегрев и многократный нагрев сварного соединения. В тех случаях, когда сварное изделие нельзя подвергнуть закалке или стабилизации (с обязательным последующим быстрым охлаждением, например, на воздухе), сварку необходимо выполнять при наименьшей погонной энергии и на максимально возможной скорости. Последовательность наложения швов должна, по-возможности, назначаться так, чтобы шов, обращенный к агрессивной среде, выполнялся в последнюю очередь. Следует всегда отдавать предпочтение механизированным способам сварки, поскольку возможность непрерывного выполнения данного шва с одной установки сводит к минимуму опасность поражения коррозией тех участков шва, где повторное возбуждение дуги вызывает нежелательное тепловое воздействие на металл шва и околошовной зоны. Однопроходные односторонние швы по этой причине предпочтительнее двусторонних. Поскольку коррозионная стойкость металла шва находится в прямой зависимости от его химического состава и содержания в нем ферритной фазы, поддержание постоянного фазового и химического состава шва — главное условие получения доброкачественного сварного соединения коррозионностойкой аустенитной стали. В этом еще одна причина необхо-

димости ориентироваться на механизированные способы сварки, могущие обеспечить стабильность режима сварки, глубины проплавления основного металла, усвоения сварочной ванной легирующих элементов. Известно, что при ручной электродуговой сварке неизбежны колебания длины дуги и соответствующие колебания состава и свойств металла шва.

Следует принимать меры против попадания брызг присадочного металла или металлической ванны на основной металл. Брызги — потенциальные очаги межкристаллитной коррозии и коррозионного растрескивания или появления межкристаллитных трещин в основном металле в месте приварки брызг.

Коррозионная стойкость аустенитных сталей и сварных швов во многом определяется состоянием их поверхности. Полированные стали обладают более высокой стойкостью против жидкостной коррозии. Шов с гладкой мелкочешуйчатой поверхностью превосходит по общей коррозионной стойкости шов, имеющий грубую неровную поверхность. В этом еще одно преимущество механизированной сварки и, особенно, сварки под флюсом перед ручной электродуговой сваркой и аргоно- или гелиедуговой сварки перед сваркой в углекислом газе или незащищенной дугой. Складки, углубления между чешуйками, щели или непровары в корне шва, соприкасающиеся с агрессивной жидкостью, — возможные очаги развития сосредоточенной и щелевой коррозии. По этой причине в сварных конструкциях из нержавеющих коррозионностойких сталей совершенно недопустимы стыковые соединения в замок или на оставшейся подкладке, если корень шва соприкасается с агрессивной средой. Здесь, безусловно, должно быть отдано предпочтение стыковым соединениям с полным проваром корня шва. Если доступ к корню шва затруднен или невозможен (например, в стыках трубопроводов), необходимо ориентироваться на газоэлектрическую сварку с расходуемыми вставками с полным их расплавлением.

При сварке многопроходных швов нет необходимости заполнять все сечение разделки металлом, обладающим требуемой стойкостью против межкристаллитной коррозии. Достаточно, если только поверхностные швы (валики), соприкасающиеся с агрессивной средой, будут стойкими против межкристаллитной или общей коррозии.

Не допускается повреждение поверхности стали и швов. Поэтому категорически запрещается возбуждать дугу не на шве. Особое внимание должно быть уделено качеству крепления сварочного кабеля к изделию. При плохом контакте между кабелем и изделием аустенитная сталь подгорает, подплавляется. В этих местах, нередко обогащенных железом или медью, неизбежно возникают очаги коррозии.

Аустенитные стали обладают большим омическим сопротивлением и низкой теплопроводностью. Поэтому необходимо выполнять их сварку при уменьшенном по сравнению с обычными сталями вылетом электрода (при ручной сварке применяют укороченные электроды). Низкая теплопроводность обусловливает большое коробление сварных конструкций, поэтому необходимо стремиться, по возможности, к односторонней сварке швами симметричного сечения при сквозном проплавлении кромок.

Предварительный и сопутствующий подогрев кромок, рекомендуемый в ряде случаев при сварке жаропрочных аустенитных сталей и сплавов, при сварке коррозионностойких сталей из-за снижения коррозионной стойкости соединения нежелателен. Подогрев может быть допущен только в случае последующей закалки или стабилизации изделия.

Остатки шлаковой корки на поверхности швов и в околошовной зоне после сварки должны быть тщательно удалены. Очистка пневматическим зубилом и другими способами, при которых образуются вмятины и забоины на металле шва, нежелательна. Аустенитные стали отличаются большой наклепываемостью, что должно учитываться при холодной правке сварных конструкций. Для снятия наклепа, если это необходимо во избежание, например, коррозионного растрескивания или ускоренной коррозии в неокислительных средах, требуется нагрев до температур не ниже 800° С ввиду повышенной прочности аустенитной стали,

сохраняющейся при высоких температурах. Обычно назначаемый для углеродистых сталей отпуск при 600—650° С практически не снимает внутренних напряжений в аустенитных сталях.

Металлургические особенности сварки. Коррозионная стойкость аустенитного шва определяется его композицией, достаточным содержанием в нем легирующих элементов (хрома), стабилизаторов (титана и ниобия), ферритизаторов (алюминия, ванадия, кремния и др.). Поэтому главной особенностью металлургии сварки коррозионностойких аустенитных сталей является создание надежных условий для усвоения указанных элементов сварочной ванной.

Коррозионностойкие стали надлежит сваривать с использованием неокислительных флюсов и покрытий электродов. В случае газовой защиты (аргоном, гелием, углекислым газом или смесями) необходимо обеспечивать надежную изоляцию сварочной ванны от атмосферы воздуха. Заслуживает внимания сварка в вакууме (электронолучевая и др.).

Коррозионная стойкость сварного шва, при прочих равных условиях, определяется содержанием в нем углерода. Каждая сотая доля процента углерода имеет определяющее значение. В случае шлаковой защиты недопустимо наличие углерода во флюсе или в покрытии электродов. Желательно сведение к минимуму содержания в них карбонатов кальция, магния. Запрещается использование сварочной проволоки со следами графитовой или углеродосодержащей смазки. Свариваемые кромки должны быть тщательно очищены от следов масла, краски.

При использовании в качестве коррозионностойкого материала стабильно-аустенитных сталей типа 25-20 (0Х23Н18), 23-28 (Х23Н28М3Д3Т, ЭИ943) и др. встречаются большие трудности с получением коррозионностойкого чисто аустенитного шва без трещин.

Главными средствами борьбы с трещинами в этом случае являются строгое ограничение в швах и основном металле элементов, вызывающих трещины: кремния, фосфора, серы и легкоплавких примесей — свинца, олова, висмута, сурьмы и др., а также газов — водорода, кислорода. Для этого необходимо применять повышенной чистоты сварочные материалы и стали, подлежащие сварке.

Технология сварки

Сварка под флюсом. Сварка под флюсом является ведущим технологическим процессом в производстве химической и нефтезаводской аппаратуры из коррозионностойких аустенитных сталей толщиной от 3 до 50 *мм* [20, 52].

Сварка под флюсом коррозионностойких аустенитных сталей чрезвычайно эффективна. Замена ручной сварки этих сталей сваркой под флюсом дает возможность:

упростить и удешевить подготовку кромок под сварку (аустенитные стали дороги и труднообрабатываемы);

сократить расход дорогостоящей аустенитной проволоки.

Сварка под флюсом обеспечивает хорошее формирование сварных швов с гладкой мелкочешуйчатой поверхностью и плавным переходом к основному металлу, отсутствие брызг на поверхности стали. Это очень важно, так как углубления между чешуйками, подрезы и места приваривания брызг часто являются очагами коррозии.

Легирование шва при сварке коррозионностойких аустенитных сталей может осуществляться через проволоку или флюс. С точки зрения повышения качества и коррозионной стойкости швов предпочтителен первый способ. Для сварки под флюсом, а также и при других видах сварки коррозионностойких сталей применяется ряд сварочных проволок, состав которых предусмотрен ГОСТом 2246—60* и ведомственными техническими условиями (табл. 13). Марки рекомендуемых флюсов приведены в табл. 5.

Все флюсы для сварки коррозионностойких сталей подлежат обязательному контролю на углерод. Содержание его во флюсе не должно превышать 0,04%.

Во избежание образования пор в швах флюсы необходимо прокаливать в интервале температур 500—900° С в течение 1—2 *ч*.

Техника и режимы сварки под флюсом коррозионностойких аустенитных и аустенитно-ферритных сталей практически такие же, как и при сварке обычных сталей [79].

Ручная электродуговая сварка. Главными особенностями ручной электродуговой сварки коррозионностойких аустенитных сталей являются:

преимущественное применение электродов с фтористокальциевым, или так называемым основным покрытием;

преимущественное использование постоянного тока обратной полярности (плюс на электроде);

сварка короткой дугой без поперечных колебаний конца электрода;

сварка сравнительно короткими электродами на небольших токах.

В соответствии с ГОСТом 10052—62* типы электродов для сварки коррозионностойких аустенитных сталей обозначаются индексом ЭА-1, а аустенитно-ферритных — ЭАФ-1. Размеры и общие технические требования к указанным электродам предусматриваются ГОСТом 9466—60.

Основные сведения об электродах для сварки наиболее широко применяемых коррозионностойких аустенитных сталей приведены в табл. 14—16 и в работе [99]. Сварку коррозионностойких аустенитных сталей покрытыми электродами выполняют на постоянном токе обратной полярности (плюс на электроде). Электроды с рутиловым покрытием могут быть использованы и для сварки на переменном токе.

Для сварки сталей типа 18-10 и 17-13 рекомендуется довольно много однотипных электродов. Выбор той или иной конкретной марки электродов необходимо производить в зависимости от требований коррозионной стойкости и свойств наплавленного металла.

Режимы сварки аустенитных сталей характерны тем, что отношение величины тока к диаметру электрода не превышает 25—30 *а/мм* [79].

При сварке аустенитными электродами в вертикальном или потолочном положениях ток уменьшают на 10—30% по сравнению со сваркой в нижнем положении.

Сварка в аргоне и гелии. При сварке в среде инертных газов происходит наиболее высокое усвоение легирующих элементов металлом шва, чем достигается повышенная стабильность его коррозионных свойств.

Применительно к коррозионностойким сталям находит применение сварка в инертных газах (аргоне, гелии и их смесях) неплавящимся вольфрамовым электродом с присадочным материалом и без него, плавящимся электродом, ручная и механизированная [20, 52].

Аргоно-дуговая сварка вольфрамовым электродом производится постоянным током прямой полярности (минус на электроде). Сварку сталей с повышенным содержанием алюминия желательно выполнять переменным током. Во избежание загрязнения металла шва неметаллическими включениями и излишнего окисления элементов запрещается выводить в процессе сварки присадочную проволоку из струи защитного газа.

Сварку плавящимся электродом коррозионностойких аустенитных сталей и сплавов следует выполнять на токе выше критического, обеспечивающем струйный перенос электродного металла. При этом исключается разбрызгивание расплавленного металла и образование очагов коррозии в местах приварившихся брызг.

При сварке аустенитных сталей в инертных газах в пространственных положениях хорошее формирование шва обеспечивается только при струйном процессе.

Для сварки коррозионностойких сталей рекомендуется использовать аргон марок А, Б и В по ГОСТу 10157—62 (преимущественно марок Б и В) и гелий. Применяют также смеси аргона с кислородом, углекислым газом, водородом, азотом, четыреххлористым кремнием и другими газами.

13. Проволока для сварки коррозионно

Марка	Химический					
	C	Mn	Si	S	P	Cr
	не более					
Св-02Х19Н9	0.04	1,0—2,0	0.5—1,0	0.018	0.025	18.0—20.0
Св-04Х19Н9	0.06	1.0—2.0	0.5—1.0	0.018	0.025	18.0—20.0
Св-06Х19Н9Т	0.08	1.0—2,0	0.4—1.0	0.018	0.030	18.0—20.0
Св-07Х18Н9ТЮ	0.09	2,0	0.80	0.015	0.030	17.0—19.0
Св-04Х19Н9С2	0.06	1,0—2.0	2.0—2.75	0.018	0.025	18.0—20.0
Св-05Х19Н9Ф3С2	0.07	1,0—2.0	1,3—1.8	0.025	0.030	18.0—20.0
Св-08Х19Н9Ф2С2	0.10	1,0—2,0	1.3—1.8	0.025	0.030	18,0—20.0
06Х20Н9С2БТЮ (ЭИ156)	0,10	1,0—2,0	2,0—2,5	0.020	0.035	19,0—21,0
08Х25Н13БТЮ (ЭИ389)		0.80	0.6—1,0			24,0—26,0
Св-08Х19Н10Б	0.05—0.10	1,2—1,7	0.70	0.018	0.025	18,5—20.5
08Х19Н10Б (ЭИ898)	0.05—0.10	1,8—2,2	0.20—0.45	0,020	0.030	18,5—20,5
07Х21Н9ФБС (ЭИ649)	0,07	0,7	1,3—1,8	0.030	0.030	20,0—22,0
000Х18Н10 (ЭИ550)	0.020	1,0—2,0	0.40	0.020	0,020	17.0—19.0
000Х17Н14М2 (ЭИ551)		0.8	0.40			16,0—18.0
000Х18Н10Б (ЭИ552)		1,0—2,0	0.40			17.0—19,0
00Х17Н14С4		0.8	3,5—4,5			16.0—18.0
Св-04Х19Н11М3	0.06	1.0—2.0	0.60	0,018	0,025	18,0—20.0
Св-08Х19Н12М3	0.06—0.10	1,0—1,7	0.30—0.70		0,030	18,5—20.5
Св-06Х19Н10М3Т	0.08	1,0—2,0	0.30—0,80			18,0—20.0
08Х19Н10М3Б (ЭИ902)	0,10	1,0—2,0	0.60	0.020	0.030	18,0—20,0
05Х20Н11М3ТБ	0,07	0,80	0,50—1,0	0.020	0,030	19,0—21,0
00Х25Н20 (ЭИ554)	0.020	1.5—2,5	0.20	0.020	0.020	23,0—26.0
00Х23Н28М3Д3Т (ЭИ516)	0,03	0 80	0.80	0.020	0.035	22,0—25,0
0Х23Н28М3Д3Т	0,05	0,60	0,30	0,015	0.020	23,0—25,0
Св-08Х25Н5ТМФ	0,10	0,80	1,0	0.018	0.030	24,0—26,5
Х14Г14Н3Т	0.10	13,0—15,0	0.80	0.020	0.035	13,0—15,0

стойких аустенитных сталей

Состав в %		Номер стандарта	Марка свариваемой стали
Ni	Другие элементы		
8,0–10,0 8,0–10,0 8,0–10,0 8,0–10,0 8,0–10,0 8,0–10,0 8,0–10,0	— — 0,5–1,0Ti; 1,0–1,4Ti; 0,6–0,95Al — 2,2–2,7V 1,8–2,4V	ГОСТ 2246–60	Х18Н9, 0Х18Н10, 00Х18Н10, Х18Н10Т, Х18Н9Т, 0Х18Н12Т, Х17АГ14, 0Х17Н5Г9АБ и им подобные, когда к металлу шва не предъявляется жестких требований по стойкости против межкристаллитной коррозии (МКК)
8,0–10,0 12,0–14,0	0,6–1,0Nb; 0,6–1,6Ti; 0,3–0,7Al 0,5–0,9Ti; 0,7–1,1Nb; 0,4–0,9Al	ЧМТУ 1-462-68, группа В05 ЧМТУ-1-634-69, группа В05	Х18Н9, 0Х18Н10, Х18Н10Т, Х18Н9Т и им подобные в углекислом газе, когда к металлу шва предъявляются требования стойкости против МКК
9,0–10,5 9,5–10,5 8,0–10,0	1,2–1,5Nb 0,9–1,3Nb 1,0–1,4Nb; 1,3–1,8V	ГОСТ 2246–60 * ЧМТУ ЦНИИЧМ 297–60 ЧМТУ ЦНИИЧМ 3211–52	Х18Н10Т, 0Х18Н10Т, 0Х18Н12Т, 0Х18Н12Б и им подобные, работающие при повышенных температурах (выше 350° С) или в условиях, когда к металлу шва предъявляются требования стойкости против МКК
9,5–11,0 13,5–15,0 9,5–11,0 13,0–15,0	— 2,0–3,0Mo 0,20–0,40Nb —	ЧМТУ ЦНИИЧМ 1352–65	000Х18Н10, 000Х18Н10Б, 000Х17Н14М2, 00Х18Н10 и им подобные
10,0–12,0 11,5–13,0 9,0–11,0	2,0–3,0Mo 2,3–2,8Mo 2,0–3,0Mo; 0,50–0,80Ti	ГОСТ 2246–60	Х18Н12Т, 0Х18Н12Т, Х17Н13М2Т, Х17Н13М3Т и им подобные, когда не предъявляются жесткие требования по МКК
9,0–11,0 10,0–12,0	2,0–3,0Mo; 0,9–1,3Nb 2,5–3,5Mo; 0,60–0,90Ti; 0,60–0,90Nb	ЧМТУ ЦНИИЧМ 297–60 ЧМТУ ЦНИИЧМ 170–59	Х16Н15М3Б, Х17Н13М2Т, Х17Н13М3Т, 0Х17Н16М3Т, 00Х18Н10, 0Х18Н12Б и им подобные, предназначенные для работы в средах повышенной агрессивности, когда к металлу шва предъявляются жесткие требования по МКК
20,0–22,0	—	ЧМТУ ЦНИИЧМ 1353–65	00Х25Н20, 0Х23Н18 и им подобные
26,0–29,0 27,0–29,0	2,5–3,0Mo; 2,5–3,5Cu; 0,40–0,70Ti 3,0–3,5Mo; 3,0–3,5Cu; 8×C=Ti	ТУ ЦНИИЧМ 136–64 ТУ НИИХИММАШ 16–57	0Х23Н28М2Т, 0Х23Н28М3Д3Т, Х18Н28М3Д3Т и им подобные, работающие в средах повышенной агрессивности типа серной, фосфорной кислот
4,8–5,7	0,06–0,12Mo; 0,08–0,26Ti; 0,08–0,15V; 0,1–0,2N	ГОСТ 2246–60 *	0Х21Н5Т (ЭИ53), 1Х21Н5Т (ЭИ811) и им подобные
2,5–3,5	До 0,6Ti	ТУ ЦНИИЧМ 492-61	Хромомарганцовые типа Х14Г14Н3Т (ЭИ711)

14. Электроды для сварки коррозионностойких аустенитных сталей

Марка электродов	Тип электродов по ГОСТу 10052—62	Марка сварочной проволоки и номер стандарта	Наплавленный металл		Марка свариваемой стали
			Тип	Структура	
ОЗЛ-14	Э-А-1	Св-02Х19Н9, Св-04Х19Н9; ГОСТ 2246—60 *	04Х20Н9	Аустенитно-ферритная; 6—10% α-фазы	0Х18Н10, 0Х18Н10Т, 00Х18Н10, Х18Н10Т и им подобные, когда к металлу шва предъявляются требования стойкости против межкристаллитной коррозии
ОЗЛ-8	Э-А-1а	Св-02Х19Н9, Св-04Х19Н9, Св-06Х19Н9Т; ГОСТ 2246—60 *	04Х20Н9, 08Х20Н9	Аустенитно-ферритная; 3,5—8,5% α-фазы	Типа 18-10, когда к металлу шва не предъявляются жесткие требования против МКК. Преимущественно 00Х18Н10, 0Х18Н10, Х18Н9, 0Х18Н10Т, Х18Н10Т, Х18Н9Т и им подобные, работающие при температурах до 350° С, а при отсутствии жидких агрессивных сред — от —253 до 800° С, а также стали типа Х14Г14Н3Т
Л-39	Э-А-1а	Св-04Х19Н9, Св-06Х19Н9Т; ГОСТ 2246—60 *	08Х19Н9С	Аустенитно-ферритная; 2,5—7,0% α-фазы	0Х18Н10, Х18Н10Т, 0Х18Н12Б и им подобные, работающие при температурах до 750° С при отсутствии жидкой агрессивной среды. Преимущественно при изготовлении аппаратов в химической и нефтеперерабатывающей промышленности
ЦЛ-11	Э-А-1Б	Св-08Х19Н10Б; ГОСТ 2246—60 *	12Х20Н9Б	Аустенитно-ферритная; 2,5—7,0% α-фазы	Х18Н10Т, Х18Н9Т, 0Х18Н12Т, 0Х18Н12Б, 1Х21Н5Т, 1Х18Н12АТ5, 1Х16Н13Б, и им подобные, работающие в агрессивных средах, когда к металлу шва предъявляются требования по стойкости против МКК
Л-38М	Э-А-1Б	Св-08Х19Н10Б, ГОСТ 2246—60 *	09Х19Н9СБ	Аустенитно-ферритная; 3,0—5,0% α-фазы	0Х18Н10, Х18Н10Т, Х18Н9Т и им подобные, работающие при температуре до 600° С в контакте с жидкими агрессивными средами, когда к металлу шва предъявляются требования стойкости против МКК
ОЗЛ-7	Э-А-1Б	Св-02Х19Н9 Допускается Св-04Х19Н9; ГОСТ 2246—60 *	08Х20Н9Б	Аустенитно-ферритная; 5,0—10,0% α-фазы	Х18Н16Т, 0Х18Н12Т, 0Х18Н12Б и им подобные, работающие в агрессивных средах, когда к металлу шва предъявляются жесткие требования по стойкости против МКК

ЛГ-40М	ЭА-1Б	Св-02Х19Н9, Св-04Х19Н9; ГОСТ 2246-60 *	08Х19Н9СБ	Аустенитно-ферритная; 2–5% α-фазы	0Х18Н10, Х18Н10Т, 0Х18Н12Б и им подобные, работающие при температурах до 600° С в жидких агрессивных средах, когда к металлу шва предъявляются жесткие требования по стойкости против МКК
НТ-15	ЭА-1Ба	Св-08Х19Н10Б; ГОСТ 2246-60 *	09Х19Н9Б	Аустенитно-ферритная; 2,5–4,5% α-фазы	Х18Н10Т, Х18Н9Т при изготовлении ответственных узлов конструкций, работающих при температурах 580–660° С и высоком давлении; Х18Н10Т, Х18Н9Т, Х18Н12Т, когда к металлу шва предъявляются требования по стойкости против МКК
НТ-15-1	ЭА-1Б	Св-08Х19Н10Б; ГОСТ 2246-60 *	08Х20Н9Б	Аустенитно-ферритная; 5,5–9,0% α-фазы	Х18Н12Т и им подобные, работающие при температурах 600–650° С и высоком давлении. Сварка первого (корневого) слоя сварных стыков; последующее заполнение разделки электродами НТ-15
ЗИО-3	ЭА-1Ба	Св-08Х19Н10Б; ГОСТ 2246-60 *	09Х19Н10Б	Аустенитно-ферритная, 2,5–5,0% α-фазы	Х18Н10Т, Х18Н9Т и им подобные, работающие при температурах до 560° С или в условиях, когда к металлу шва предъявляются требования стойкости против МКК
ЭА-898/19	—	ЭП898 (08Х19Н10Б); ЧМТУ / ЦНИИЧМ 297-60	09Х18Н10МБ	Аустенитно-ферритная; 3,0–5,0% α-фазы	Х18Н10Т, Х18Н12Т, 1Х14Н16Б (ЭП694) и им подобные
ЭА-898/21	—	ЭП898 (0°Х19Н10Б); ЧМТУ / ЦНИИЧМ 297-60	1Х18Н9МБФ	Аустенитно-ферритная; 2,0–8,0% α-фазы	Х18Н10Т, Х17Н13М2Т и им подобные, работающие при температурах до 350° С и подвергающиеся после сварки термической обработке
ЭА-400/10У	—	Св-04Х19Н11М3; ГОСТ 2246-60 *	07Х18Н10М3Ф	Аустенитно-ферритная; 5,0–12,0% α-фазы	Х17Н13М2Т, Х17Н13М3Т, Х18Н10Т, Х18Н12Т и им подобные, работающие в контакте с агрессивной средой при температурах до 350° С и не подвергающиеся термической обработке после сварки
ЭНТУ-3М	ЭА-1М2	Св-04Х19Н11М3; ГОСТ 2246–60 *	08Х19Н10М2	Аустенитно-ферритная; до 3,0% α-фазы	Х17Н13М2Т, Х17Н13М3Т, Х18Н12Т и им подобные, работающие в контакте с агрессивной средой при температурах до 360° С и не подвергающиеся термической обработке после сварки
ЦЛ-4	ЭА-1М2	Св-06Х19Н9Т; ГОСТ 2246–60 *	08Х19Н9М2	Аустенитно-ферритная; 2,5–10% α-фазы	

Продолжение табл. 14

Марка электродов	Тип электродов по ГОСТу 10052—62	Марка сварочной проволоки и номер стандарта	Наплавленный металл		Марка свариваемой стали
			Тип	Структура	
НИАТ-1	ЭА-1М2	Св-04Х19Н9, Св-06Х19Н9Т; ГОСТ 2246—60 *	1Х18Н9М2	Аустенитно-ферритная; 2.5—6.0% α-фазы	0Х18Н10, Х18Н9, Х18Н10Т, 0Х18Н12Б и им подобные, когда к металлу шва предъявляются требования стойкости к МКК
НИАТ-6	—	ЭИ925 (Х17Н5М3); ЧМТУ 514—61	09Х16Н7М2Ю	Аустенитно-мартенситная (после термической обработки)	Х15Н9Ю (ЭИ904), работающая в атмосферных условиях
НИАТ-6АМ	—	ЭИ904 (Х15Н9Ю); ЧМТУ / ЦНИИЧМ 514—61	09Х14Н7МЮ	То же	Х17Н5М3 (ЭИ925), работающая в атмосферных условиях
ЭА-902/14	ЭА-1М2Б	ЭИ902 (Х19Н10М2Б); ЧМТУ / ЦНИИЧМ 297—60	08Х19Н10М3Б	Аустенитно-ферритная; 2.0—8.0% α-фазы	Высокопрочные аустенитные, работающие при температуре до 500° С
СЛ-28	ЭА-1М2Б	ЭП89 (0Х20Н11М3Б); ЧМТУ / ЦНИИЧМ 170—59	09Х19Н11М2СБ	Аустенитно-ферритная; 4.0—5.0% α-фазы	Х17Н13М2Т, Х17Н13М3Т, 0Х18Н12Б, 0Х21Н6М2Т и им подобные, работающие при температурах до 700° С, когда к металлу шва предъявляются требования по стойкости против МКК
НЖ-13	ЭА-1М2Б	Св-04Х19Н11М3; ГОСТ 2246—60 *	07Х18Н10М2Б	Аустенитно-ферритная; 4.0—8.0% α-фазы	Х17Н13М2Т, Х17Н13М3Т, 0Х17Н16М3Т, 1Х16Н13М2Б, 0Х21Н6М2Т и им подобные, работающие в агрессивных средах при температурах до 700° С, когда к металлу шва предъявляются жесткие требования по стойкости против МКК. Коррозионностойкий слой при сварке двухслойных сталей 20К + Х17Н13М2Т, 20К + + Х17Н13М3Т, работающих под давлением в агрессивных средах при температурах до 350° С
ЭА-400/13	ЭА-1М2Б	Св-04Х19Н11М3; ГОСТ 2246—60 *	08Х19Н10М2Б	Аустенитно-ферритная; 2.0—8.0% σ-фазы	Типа Х17Н13М2Т, Х17Н13М3Т, работающие при температурах до 500° С, когда к металлу шва предъявляются требования по стойкости против МКК

ЭА-606/11	ЭА-1Ф2	Св-08Х19Н9Ф2С2; ГОСТ 2246—60 *	08Х19Н9Ф2С2	Аустенитно-ферритная; 5,5% α-фазы	0Х18Н12Т, Х18Н9, Х18Н9Т и им подобные, работающие в средах слабой агрессивности при температурах до 350° С, когда к металлу шва предъявляются требования по МКК. Высокомарганцовые типа 0Х17Г9АН5Б, Х14Г14Н3Т
ГЛ-2	ЭА-1Ф2	Св-08Х19Н9ФС2; ГОСТ 2246—60 *	08Х19Н9Ф2С2	Аустенитно-ферритная; 5,5% α-фазы	0Х18Н10, Х18Н10Т, 0Х18Н12Б и им подобные, работающие при температуре до 350° С, когда к металлу шва предъявляются требования стойкости по МКК. 0Х13, Х18Н10Т, облицовочный слой двухслойных сталей
ОЗЛ-3	—	ЭИ654; ЧМТУ / ЦНИИЧМ 514—61; ТУ-173—60	—	Аустенитно-ферритная; 15% α-фазы	ЭИ654 и ей подобные, работающие в средах типа крепкой азотной кислоты
15М	—	0Х23Н28М3Д3Т (ЭИ943); ТУ НИИХИММАШ 16—57 0Х23Н28М2Т (ЭИ628), ЧМТУ / ЦНИИЧМ 3719—53	06Х23Н28М3Д3Б 06Х23Н28М2Б	Аустенитная	0Х23Н28М3Д3Т (ЭИ943), 0Х23Н28М2Т (ЭИ628) и им подобные толщиной до 6 мм, работающие в средах повышенной агрессивности (серная, фосфорная кислоты при температуре до 80° С)
ОЗЛ-11 ОЗЛ-11б	— —	0Х23Н28М3Д3Т (ЭИ943); ТУ НИИХИММАШ 16—57	08Х23Н28М3Д3 08Х23Н28М3Д3Б	Аустенитная	0Х23Н28М3Д3Т (ЭИ943), 0Х23Н28М2Т (ЭИ628) и им подобные, работающие в агрессивных средах типа серной и фосфорной кислот; однопроходная сварка
ГЛ-33	ЭАФ-1	Св-04Х18Н9; ГОСТ 2246—60 *	07Х22Н9	Аустенитно-ферритная; 12—20% α-фазы	Аустенитно-ферритные, а также стали типа 10Х18Н3Г3Д2Л и ей подобные, работающие в условиях эрозионного и кавитационного износа
08Х25Н5ТМФ / Н-48	ЭАФ-1МФ	Св-08Х25Н5ТМФ, ГОСТ 2246—60 * ЭП401 (06Х25Н5ТМФ), ЧМТУ 778—62	1Х25Н5ТМФ	Аустенитно-ферритная	1Х21Н5Т (ЭИ811), 0Х21Н5Т (ЭП53), Х25Н5ТМФ (ЭИ954) и им подобные, работающие в агрессивных средах при температурах до 300° С
ОЗЛ-17 ОЗЛ-17У	—	ЭП516 (00Х23Н28М3Д3Т); ТУ ЦНИИЧМ № 136—64	05Х23Н28М3Д3Б	Аустенитная	0Х23Н28М3Д3Т, 00Х23Н28М3Д3Т, 0Х23Н28М2Т и им подобные, работающие в средах повышенной агрессивности типа серной и фосфорной кислот
АНВ-3	—	Х14Г14Н3Т; ЧМТУ 492—61	14Х14Г14Н3Т	Аустенитная	Х14Г14Н3Т (ЭИ711) и ей подобные, работающие в слабых агрессивных средах, а также для изготовления хладостойкой аппаратуры

Режимы сварки коррозионностойких аустенитных сталей и сплавов в среде аргона и гелия приведены в томе 2 настоящего справочника по сварке.

15. Типичный химический состав металла, наплавленного электродами для сварки коррозионностойких аустенитных сталей (в %)

Марка электрода	C, не более	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Другие элементы
				не более				
ОЗЛ-14	0.04	1.50	0.9	0.020	0.030	20.5	8.8	—
ОЗЛ-8	0.08	1,40	0.60	0.020	0.030	20.0	9.8	—
Л-39	0.08	1.95	1.10	0.012	0.012	18.5	8.5	—
ЦЛ-11	0.12	1.60	1.0	0.020	0,030	20.0	9.5	1.0 Nb
ЛЗ8 М	0.09	1.30	1.4	0.012	0.020	18,5	8,5	1.0 Nb
ОЗЛ-7	0.08	1.50	0.85	0.020	0.030	20.0	9.0	0.95 Nb
Л-40М	0.08	1.30	1.2	0.012	0.020	18.5	8.5	0.90 Nb
ЦТ-15	0.09	1.90	0.35	0.014	0.026	19.0	9,4	0.80 Nb
ЦТ-15-1	0.08	1.80	0.35	0.020	0.035	19.9	9.4	0.80 Nb
ЗИО-3	0.09	1.80	0.55	0.035	0,035	18.5	10,0	0.90 Nb
ЭА-898/19	0.09	1.60	0.35	0.035	0.035	17.5	10.5	0.78 Nb; 0.70 Mo
ЭА-898/21	0.10	1.80	0.53	0.025	0.025	18.0	9.2	0,65 Mo; 1.0 Nb; 0,60 V
ЭА-400/10У	0.07	2.40	0.48	0.025	0.025	18.0	10,5	2.5 Mo; 0.52 V
ЭНТУ-3М	0.08	1.70	0.70	0.012	0.025	18.5	10.0	2.2 Mo
ЦЛ-4	0,08	2.0	0.50	0.020	0.030	18.5	9.2	2.3 Mo
НИАТ-1	0.10	1.20	0.75	0.020	0.030	18.2	8.7	2.0 Mo
НИАТ-3	0.09	0.30	1.34	0.020	0.035	15,7	7.6	2.0 Mo; 0.79 Al
НИАТ-6АМ	0.09	0.25	1.40	0.020	0.035	14.3	7,48	1.40 Mo; 0.55 Al
ЭА-902/14	0.08	1.40	0.37	0.014	0 016	18.5	10.5	2.76 Mo; 0.80 Nb
СЛ-28	0.09	1.7	1.6	0.006	0,027	19.0	11.0	2.4 Mo; 0.9 Nb
НЖ-13	0.07	1.4	0.80	0.020	0.035	18.2	10.2	2.4 Mo; 0.8 Nb
ЭА-400/13	0.08	1.7	0.60	0.025	0.025	18,5	10.5	2.5 Mo; 0.85 Nb
ЭА-606/11	0.08	1.2	1.3	0.016	0.010	18.0	8.6	2.0 V
ГЛ-2	0.08	1.4	1.7	0.012	0.020	18.5	8.6	1.40 V
1-М	0.06	0.40	0.25	0,020	0.030	23,0	27,0	3.0 Mo; 3,0 Cu; 0.75 W; 0.8 Nb
ОЗЛ-11	0.08	0.85	0.55	0.025	0.030	24.0	27.0	3.0 Mo; 3,3 Cu
ЦЛ-33	0.07	1.6	0.30	0.030	0.030	21.5	8.5	—
08Х25Н5ТМФ Н-48	0.10	0.95	0,65	0.020	0.035	25.0	5.0	0.08 Mo; 0.09 V; 0.14 N
ОЗЛ-17	0.05	1.2—2.0	0.3—0.8	—	—	22.0—26.0	24.0—29.0	2.5—3.5 Mo; 0.15—0.35 Nb; 2.5—3.2 Cu
ОЗЛ-17У	0.04	1.2—2.0	0.3—0.8	—	—	22,0—25.0	24.0—29.0	2.5—3.5 Mo; 2.5—3.2 Cu; 0.3—0.45 Nb
АНВ-3	0.14	12—15	0.5—0.6	0.032	0.035	12,0—15.0	2.5—3.5	До 0.5 Ti

Перспективно применение плазменной дуги. Отличительной особенностью этого способа является чрезвычайно незначительный расход защитного газа. Другая замечательная особенность плазменной сварки состоит в практически полной нечувствительности к изменениям длины дуги в широких пределах и в возможности придания дуге любой формы — круглой, овальной, прямоугольной и т. д.

Сварка в углекислом газе. При сварке в углекислом газе происходит науглероживание металла шва на 0,02—0,04%. Этого достаточно для резкого снижения коррозионной стойкости шва, если не принять специальных мер для нейтрализации углерода. Стандартные электродные проволоки, выпускаемые по ГОСТу 2246—60, не обеспечивают требуемой коррозионной стойкости шва. Для сварки в CO_2 сталей типа 18-10 и 18-12 разработаны специальные проволоки 06Х20Н9С2БТЮ (ЭИ156) и 08Х25Н13БТЮ (ЭИ389) (та л. 13), успешно применяемые в промышленности.

Технология автоматической и полуавтоматической сварки в CO_2 аустенитных сталей подробно описана в работах [16, 79]. Для примера в табл. 17 приве-

дены ориентировочные режимы сварки в CO_2 нержавеющей аустенитной стали. Недостатком сварки в CO_2 применительно к коррозионностойким аустенитным сталям является довольно интенсивное разбрызгивание (в среднем 10—12%) и образование очагов коррозии в месте приваривания брызг к металлу. Использование тонкой проволоки и сварка на малых вылетах уменьшают разбрызгивание. Чтобы брызги не приваривались к металлу, рекомендуется его перед сваркой покрывать меловым раствором, заменяемым на воде.

16. Типичные механические свойства металла швов, выполненных коррозионностойкими аустенитными электродами

Марка электродов	$\sigma_т$	$\sigma_в$	δ	ψ	$a_н$ в *кГсм/см²*	φ в *град*
	в *кГ/мм²*		в %			
ОЗЛ-14	38	58	36	30	12	180
ОЗЛ-8	35	60	36	—	12	180
Л-39	30	55	—	—	10	160
ЦЛ-11	36	60	24	60	7	—
Л-38М	30	60	30	—	9	180
ОЗЛ-7	40	64	25	—	10	—
Л-46М	35	60	24	—	7	160
ЗИО-3	—	60	24	—	7	180
ЭА-898/19	40	62	25	40	9	—
ЭА-898/21	—	60	24	—	7	160
ЭА-400/10У	35	55	25	—	9	160
ЭНТУ-3М	—	55	12	—	9	180
ЦЛ-4	—	58	30	—	10	180
НИАТ-1	—	55	30	—	10	180
НИАТ-6	—	80	—	—	9	—
ЭА-902/14	44	60	27	43	10	160
СЛ-28	—	60	38	25	12	—
НИИ-13	45	60	26	—	10	—
ЭА-400/13	40	65	25	40	8	160
ЭА-606/11	44	65	28	41	10	—
ГЛ-2	30	60	30	—	9	180
15М	30	55	23	40	7	120
ЦЛ-33	35	65	20	40	7	—
08Х25Н5ТМФ/Н-48	49	73	25	35	6	180
ОЗЛ-17	34—42	57—62	30	40—60	11—17	—
ОЗЛ-17У	35—42	57—62	27—40	40—60	12—15	—
АНВ-3	—	70	25	—	10	—

В ряде случаев, когда к сварным соединениям не предъявляются жесткие требования по качеству, коррозионностойкие аустенитные стали типа 18-10 можно сваривать в азоте и даже на воздухе (незащищенная дуга). Для этих целей рекомендуются сварочные проволоки марок Э11156 и Э11389.

17. Режимы автоматической сварки в CO_2

Толщина металла	Диаметр электрода	Сварочный ток в *а*	Напряжение дуги в *в*	Скорость сварки в *м/ч*	Вылет электрода в *мм*	Расход газа в *л/мин*
в *мм*						
1,0	0,5	30—40	17	30—40	5	6
1,5	0,8	40—80	17—18	30—40	6	6—7
2,0	0,8—1,2	100—140	18—20	25—40	6—9	6—8
2,5	1,0—1,2	110—150	18—20	20—35	7—9	6—8
3,0	1,2	140—160	19—20,5	20—35	9—10	8—9
3,0	1,6	140—170	23—27	20—35	15	9—12
3,0	2,0	180—190	25—28	25—30	15—20	12—17

Электронолучевая сварка. Важной технологической особенностью этого способа сварки является возможность получения швов с очень малым коэффициентом формы (книжкальной формы) и минимальным термическим воздействием сварочного нагрева на основной металл в околошовной зоне. Сварные соединения отличаются повышенной стойкостью против коррозии. Электронолучевую сварку надлежит применять там, где получить надежно работающую конструкцию с помощью обычных способов сварки нельзя.

Электрошлаковая сварка. Этот высокопроизводительный способ соединения металлов может успешно применяться в производстве изделий из коррозионностойких аустенитных сталей [100]. Сварные соединения подлежат обязательной термической обработке (закалке или стабилизирующему отжигу), в противном случае возможно образование ножевой коррозии из-за чрезмерного перегрева стали в околошовной зоне.

Сварку коротких швов рекомендуется производить пластинчатым электродом (толщиной 6—20 *мм*), длинные швы сваривают проволочным электродом (одним или более, в зависимости от толщины стали). Аустенитная проволока ввиду большой жесткости и плохой электро- и теплопроводности при длительной сварке нарушает работу токоподводящих мундштуков. Если сварка продолжается несколько часов, рекомендуется применять аустенитную проволоку с омедненной поверхностью.

Омеднение гарантирует отличное контактирование сварочной проволоки с мундштуком.

Для электрошлаковой сварки коррозионностойких сталей используют флюсы систем: CaF_2—CaO—Al_2O_3; CaF_2—CaO; CaF_2—Al_2O_3 и др. следующих марок: АНФ-6, АНФ-7, АНФ-8, 48-ОФ-6, АНФ-14 и др. (см. табл. 5).

Типовые режимы электрошлаковой сварки коррозионностойких аустенитных сталей приведены в табл. 18.

18 Типовые режимы электрошлаковой сварки коррозионностойких аустенитных сталей

Сварка проволочным электродом, сталь Х18Н10Т, толщина 100 мм, флюс АНФ-8 (CaF_2 – Al_2O_3 – CaO)

Параметры	Величина	Параметры	Величина
Постоянный ток обратной полярности в *а* (на одном электроде)	400–420	«Сухой» вылет электрода в *мм*	40–45
Количество электродов	2	Расстояние между электродами в *мм*	35–40
Напряжение сварки в *в*	30–35	Приближение электрода к ползунам в *мм*	7–10
Диаметр электрода в *мм*	3	Длительность выдержки электрода у ползуна в *сек*	3–4
Глубина шлаковой ванны в *мм*	40–50	Скорость поперечных колебаний в *м/ч*	40

Сварка пластинчатым электродом

Марка стали, сплава	Свариваемое сечение	Сечение электрода	Марка флюса	Средний сварочный ток в *а*	Напряжение сварки в *в*	Ширина зазора между кромками в *мм*
	в *мм*					
1Х18Н9Т	50×50	6×50	АНФ-1П	900	24–26	25
ЭИ654	100×100	10×100	АНФ-7	1500	34–36	30
Х20Н80Т	125×125	10×125	АНФ-1П	1800	23–24	30

Сварка двухслойных сталей. Двухслойные стали Ст. 3 (сталь 10, 15ХМ и др.) + Х18Н10Т (Х18Н12Т, Х17Н13М3Т, Х23Н28М3Д3Т и др.) широко применяются в качестве коррозионностойких в химическом и нефтехимическом производстве.

Сварка основного слоя двухслойной стали производится по обычной для данной конструкционной стали технологии (под флюсом, покрытыми электродами, электрошлаковой и т. д.), а коррозионностойкого слоя — в один или несколько слоев (в зависимости от его толщины). Выбор сварочной проволоки, электродов и флюсов производится в зависимости от химического состава коррозионностойкого слоя.

В табл. 19 и 20 приведены марки проволоки и электродов, применяемых для сварки наиболее распространенных двухслойных сталей с облицовочным слоем из сталей типа 18-8, 18-10 и 18-12.

19. Проволока, применяемая для сварки биметалла с высоколегированным коррозионностойким облицовочным слоем из сталей типа 18-8, 18-10, 18-12 (марки 1Х18Н9Т, Х18Н10Т, 0Х18Н10Т, Х18Н12Т, 0Х18Н12Т, 0Х18Н12Б и другие, им подобные)

Марка сварочной проволоки	ГОСТ или ТУ	Марка флюса	Количество слоев при сварке тонкого биметалла	Требования к металлу шва по стойкости против МКК
Св-07Х25Н13	ГОСТ 2246—60	АН-26, АНФ-14, 48-ОФ-10	2	Не предъявляются
07Х25Н12Т (ЭП75) 06Х25Н12ТЮ (ЭП87)	ЧМТУ/ЦНИИЧМ 183—59 ЧМТУ/1-469-68 группа В05	АН-26, 48-ОФ-10, 48-ОФ-6, АНФ-14	2	Предъявляются
08Х25Н13БТЮ (ЭП389)	ЧМТУ-1-634—69, группа В05	АН-26, 48-ОФ-10, 48-ОФ-6, АНФ-14	1—2	Предъявляются жесткие требования

Чтобы обеспечить минимальное разбавление аустенитного и неаустенитного металла при переходе от основного слоя к облицовочному и наоборот, сварку производят с принятием мер, обеспечивающих наименьшее проплавление нижележащего слоя, например, сварка сдвоенным или ленточным электродом, сварка на спуск, применение пемзовидного флюса, сварка постоянным током прямой полярности и т. д.

При сварке толстого биметалла с целью предотвращения образования в зоне перехода от аустенитного слоя к неаустенитному объемов металла с пониженной пластичностью практикуется наплавка промежуточного слоя с использованием низкоуглеродистого слоя стали Армко или Св-08 в сочетании с сильно окислительным флюсом. В ряде случаев, наоборот, применяют промежуточный слой из стали или сплава с повышенным содержанием никеля, например, производят наплавку проволокой Св-10Х15Н25М6 или электродами типа ЭА-3М6 (наплавленный металл типа Х15Н25М6) и др.

Термическую обработку конструкций и изделий из биметалла обычно не производят. В тех случаях, когда это необходимо, она должна выполняться с учетом обеспечения требуемой коррозионной стойкости облицовочного слоя.

20. Электроды для сварки высоколегированного слоя типа 18-8, 18-10 двухслойных сталей

Марка электродов	Тип электродов по ГОСТу 10052—62	Марка сварочной проволоки и технические условия	Наплавленный металл		Марка стали коррозионностойкого слоя
			Тип	Структура	
ЗИО-7	Э-2Б	Э08Х25Н13Б), ЧМТУ 3060—63	08Х24Н13Б	Аустенитно-ферритная; до 2,5% α-фазы	Типа 18-8, когда к металлу шва предъявляются требования стойкости против МКК
СЛ-2	Э-2	Э07Х25Н12Г), ЧМТУ 183—59 Э08Х20Н12Г2Ю), ЧМТУ 1-369-68 группа Б6	09Х20Н12Г2Ю 09Х25Н12Г	Аустенитно-ферритная; 4,0—5,0% α-фазы	Х18Н10Т, 0Х13, когда к металлу шва не предъявляются требования стойкости против МКК. Сварка неаустенитных сталей с аустенитными типа Х18Н10Т, а также хромистыми типа 0Х13
ЗИО-8	Э-2	Св-07Х25Н13, ГОСТ 2246—60 *	07Х24Н12	Аустенитно-ферритная; 2,5—5,0% α-фазы	Типа 18-8, когда к металлу шва не предъявляются требования по стойкости против МКК. Сварка несловых конструкций из стали 0Х13 без последующей термической обработки, а также для сварки сталей типа Х18Н10Т с малоуглеродистыми неаустенитными
ЦЛ-9	Э-2Б	Св-07Х25Н13, ГОСТ 2246—60 *	12Х21Н11Б	Аустенитно-ферритная; более 2,5% α-фазы	Х18Н10Т, Х18Н9Т, 0Х13 и им подобные, работающие в агрессивных средах, когда к металлу шва предъявляются требования по стойкости против МКК. Используются для сварки стали Х25Т и ей подобных

СВАРКА ЖАРОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ

Основные свойства и особенности сварки

Теоретические основы жаростойкости и высокотемпературного окисления металлов освещены в монографиях [3, 22, 111, 112]. Скорость окисления металла зависит в основном от трех факторов: состава среды, рабочей температуры изделия и защитных свойств окисной пленки, образующейся на металле (сплаве, сварном шве), которые, в свою очередь, определяются его химическим составом [97]. Пористая или рыхлая окисная пленка защитными свойствами не обладает. Жаростойкость сплава и сварных соединений зависит также от их качества, состояния поверхности, напряженного состояния, структуры металла и т. д.

При контакте с кислородосодержащей средой происходит в основном общая коррозия металла с образованием на поверхности слоя сложных окислов. При наличии в газовой атмосфере сернистых соединений (SO_2, H_2S и др.), помимо общей газовой коррозии, возможно поражение аустенитных сталей, сплавов и сварных швов межкристаллитной газовой коррозией [53, 92, 97]. Причиной этого рода коррозии является проникновение в глубь металла по границам зерен легкоплавкой сульфидной эвтектики $Ni - Ni_3S_2$.

Литые аустенитные стали, сплавы и сварные швы находятся в более тяжелых условиях, чем деформированные материалы с равноосной структурой, так как в первом случае сернистая эвтектика больше распространяется в глубь металла по границам кристаллитов, а во втором — преимущественно вширь по границам зерен. Аустенизация сварных швов, при которой происходит рекристаллизация металла и столбчатые кристаллы в шве уступают место равноосным зернам, заметно повышает их стойкость против межкристаллитной коррозии в этих условиях [53]. Марганец (до 6—8%) повышает стойкость швов против межкристаллитной газовой коррозии, вызванной наличием сернистых соединений в рабочей атмосфере [51].

Чем больше никеля в стали или сварном шве, тем больше опасность поражения его межкристаллитной газовой коррозией в сероводородсодержащей среде. Поэтому для эксплуатации при высоких температурах в сероводородсодержащих средах заслуживают предпочтения стали и сплавы с пониженным содержанием никеля. Исследованиями последних лет [106, 107] установлено, что хромоникелевые аустенитные сплавы с 40—60% хрома стойки при высоких температурах в сероводородсодержащих средах.

Жаростойкие аустенитные стали и сварные швы подвержены газовой коррозии в средах, содержащих соединения ванадия V_2O_5 и др. (так называемая ванадиевая коррозия) [6, 53], и науглероживанию в цементационных средах [15, 53]. Легирование сплава хромом в количестве 35—60% предупреждает ванадиевую коррозию [109, 110]. Для повышения стойкости сплавов против науглероживания их легируют кремнием в пределах 2—3%. Для этих целей, как известно, применяют стали Х25Н20С2, 4Х18Н25С2, сплав ЗХ18Н35С2, а для их сварки кремнийсодержащую аустенитную проволоку ЭП532 (08Х25Н20С2Р1).

Наряду с науглероживанием может иметь место в определенных условиях и азотирование жаростойких аустенитных сталей, сплавов и сварных швов. Устранение столбчатой структуры, как и в случае сульфурации, оказывается полезным для уменьшения глубины проникновения углерода и азота в шов. В ряде случаев интенсивную газовую коррозию могут вызвать частицы сварочного шлака, не удаленные с поверхности шва [108, 109]. Во всех случаях независимо от агрессивной среды требуемая жаростойкость сварного соединения достигается максимальным приближением композиции шва к композиции свариваемого металла.

Высокая жаростойкость аустенитных сталей, сплавов и сварных швов определяется их композицией и прежде всего положительным действием хрома, кремния и алюминия. Важную роль играет никель. Увеличение количества этих элементов в металле шва улучшает защитные свойства окисной пленки благодаря повышению в ней содержания шпинелей $NiO \cdot (Cr, Fe)_2O_3$; $FeO \cdot Al_2O_3$ и плотного окисла SiO_2.

Из числа элементов, применяемых для легирования шва при сварке аустенитных сталей, ванадий и бор вызывают падение жаростойкости. Другие элементы: вольфрам, марганец, а также молибден при относительно небольших его количествах (до 2—3%) мало влияют на жаростойкость аустенитных швов. По данным авторов [53, 58, 95] легирование аустенитных швов типа Х25Н20, содержащих 0,4—0,7% бора, кремнием в пределах 2,5—3,0% позволяет сохранить его жаростойкость (несмотря на высокое содержание бора) на уровне жаростойкости стали Х25Н20С2 (ЭИ283) вплоть до 1100° С. Большинство жаростойких аустенитных сталей и сплавов (табл. 21 и 22) имеют стабильноаустенитную структуру и в процессе нагрева (охлаждения), а также при сварке фазовых превращений не претерпевают, кроме дисперсионного твердения, связанного с образованием

21. Химический состав в % некоторых жаростойких аустенитных сталей и сплавов

Марка стали, сплава	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Другие элементы
	не более							
Аустенитно-ферритные стали								
Х20Н14С2 (ЭИ211)	0,20	1,50	2,0–3,0	0,025	0,035	19,0–22,0	12,0–15,0	–
Х23Н13 (ЭИ319)	0,20	2,0	1,0	0,025	0,035	22,0–25,0	12,0–15,0	–
Х25Н13Т2*	0,14–0,20	1,0–1,5	0,6	–	–	23,5–26,5	12,0–14,0	0,10–0,18 Ti; 0,10–0,16 N
0Х20Н14С2 (ЭИ732)	0,08	1,5	2,0–3,0	0,025	0,035	19,0–22,0	12,0–15,0	–
22-11-2,5	0,10–0,25	0,6–1,2	0,6–1,5	0,040	0,045	20,0–23,0	10,5–12,5	2,4–3,0 W; до 0,2 Ti; » 0,2 V; » 0,25 Mo
Аустенитные стали								
4Х18Н25С2 (Х18Н25С2, ЭЯ3С)	0,32–0,40	1,5	2,0–3,0	0,020	0,035	17,0–19,0	23,0–26,0	–
0Х23Н18	0,10	2,0	1,0	0,020	0,035	22,0–25,0	17,0–20,0	–
Х23Н18 (ЭИ417)	0,20	2,0	1,0	0,020	0,035	22,0–25,0	17,0–20,0	–
Х25Н16Г7АР (ЭИ835)	0,12	5,0–7,0	1,0	0,020	0,035	23,0–26,0	15,0–18,0	0,3–0,45 N; до 0,02 B
Х25Н20С2 (ЭИ283)	0,20	1,5	2,0–3,0	0,020	0,035	24,0–27,0	18,0–21,0	–
Х25Н20С2Д (25-20Д)*	0,18	0,7–1,5	0,8–2,0	0,030	0,035	22,0–26,0	17,0–21,0	–
1Х25Н25ТР (ЭИ813)	0,07–0,12	1,0–2,0	0,8	0,020	0,035	23,0–26,0	24,0–27,0	1,1–1,6 Ti; до 0,010 B
45Х15Г14Ю (ЭИ499)	0,40–0,50	13,0–15,0	0,6	0,030	0,040	14,0–16,0	До 0,5	1,2–1,8 Al
45Х15Г14С10 (ЭИ577)	0,40–0,50	13,0–15,0	1,2–1,8	0,030	0,040	14,0–16,0	До 0,5	1,2–1,8 Al
Аустенитные сплавы								
ХН38ВТ (ЭИ703)	0,06–0,12	0,7	0,8	0,020	0,030	20,0–23,0	35,0–39,0	2,8–3,2 W; 0,7–1,2 Ti; до 0,5 Al
5Х28Н48В5*	0,4–0,6	0,8–1,5	0,8–1,5	0,040	0,045	26,0–30,0	46,0–52,0	4,0–5,0 W
Х20Н80	0,15	0,7	0,4–1,3	0,025	0,030	20,0–23,0	75,0–78,9	До 0,2 Al; » 1,0 Fe
ХН35ВЮ (ЭИ468)*	0,10	0,5–1,0	0,5	0,020	0,035	48,0–52,0	35,0–38,0	9,0–11,0 W; 1,8–2,5 Al
ХН50 (ЭП668)	0,05	0,30	0,30	0,015	0,015	46,0–50,0	48,0–54,0	До 0,3 Al; » 0,03 Ce; » 1,0 Fe

* Стали и сплавы, употребляемые только в виде литья.

22. Назначение и свойства жаростойких аустенитных сталей и сплавов [10, 53, 62, 90, 94, 98]

Марка стали, сплава	Температура начала интенсивного окалинообразования в воздушной среде в °С	Особые свойства	Примерное назначение
Х20Н14С2 (ЭИ211) 0Х20Н14С2 (ЭИ732)	1000 -1050	Устойчивы в науглероживающих средах. Свариваемость хорошая; при сварке изделий повышенной жесткости полезен подогрев до 250—550° С	Подвески и опоры в котлах, печные контейнеры, ящики для цементации. Окалиностойкие детали печной арматуры, трубы
4Х18Н25С2 (Х18Н25С2, ЭИ3С)	1100	Обладает повышенной прочностью до 800° С, но низкой пластичностью. Устойчива в науглероживающих средах. Сварка затруднена, изделия повышенной жесткости рекомендуется сваривать с подогревом до 250—550° С	Печное оборудование, конвейеры и другие детали, работающие при 900—1100° С
0Х23Н18, Х23Х18 (ЭИ417)	1050	В интервале температур 600—800° С склонны к охрупчиванию из-за образования σ-фазы. Свариваемость удовлетворительная	Трубы и детали установок для конверсии метана, пиролиза, жаровые трубы камер сгорания, сопловые лопатки
Х25Н16Г7АР (ЭИ835)	1050 - 1100	Свариваемость удовлетворительная. Рекомендуется для замены жаростойких сплавов на никелевой основе	Детали газопроводных систем, изготовляемые из тонких листов, ленты и сортового проката, работающие при 800—950° С
Х20Н20С2 (ЭИ283), 4Х25Н19С2Л Х25Н20С2Л	1150—1200 1100—1150	Устойчивы в неуглероживающих средах. Сталь ЭИ283 в интервале температур 600—800° С склонна к охрупчиванию из-за образования σ-фазы. Деформированная сталь Х25Н20С2 сваривается удовлетворительно, свариваемость литых сталей Х25Н20С2Л и 4Х25Н19С2Л затруднена из-за образования околошовных трещин. Сварку изделий повышенной жесткости рекомендуется производить с подогревом до 250—550° С	Подвески и опоры в котлах, трубы электролизных и пиролизных установок, работающие до 1000—1050° С, печные конвейеры, цементационные ящики и муфели
1Х25Н25ТР (ЭИ813)	1100	Свариваемость стали малых толщин удовлетворительная	Детали газовых систем, изготовляемые из листового и сортового металла, работающие при умеренных напряжениях в интервале температур 800—950° С
ХН38ВТ (ЭИ703)	1050	Свариваемость удовлетворительная	Листовые детали, работающие при 600—950° С

Продолжение табл. 22

Марка стали, сплава	Температура начала интенсивного окалинообразования в воздушной среде в °С	Особые свойства	Примерное назначение
5Х28Н48В5	1150—1200	Свариваемость затруднена. Сварку изделий повышенной жесткости рекомендуется производить с подогревом до температуры выше 250—300° С	Детали и трубы газовых систем, работающие при 900—1100° С
ХН60, Х20Н80	1100	Окалиностойки в окислительной атмосфере, водороде. Сплав Х15Н60 неустойчив в сероводородсодержащих средах. Свариваемость удовлетворительная	Нагревательные элементы электропечей, детали камер сгорания
ХН35ВЮ (ЭИ668)	1200—1250	Свариваемость удовлетворительная, сварка производится с подогревом выше 250—300° С	Литые детали, работающие при температурах до 1100—1200° С
ХН50 (ЭИ668)	1200—1250	Устойчив в сероводородсодержащих средах. Свариваемость хорошая. Сварка производится с подогревом до температуры выше 250—300° С	Литые и листовые детали, работающие при температурах до 1100—1200° С. Сварочная проволока
45ХН4Г4Ю (ЭИ599)	850	Свариваемость хорошая	Оборудование для разливки базальтовых плит и др. Печное оборудование, работающее при температурах до 800—900° С
45Х15Г14СЮ (ЭИ577)	900	Свариваемость хорошая	Для колпаковых печей, предназначенных для отжига листов, ленты, проволоки и т. д., работающих при температуре до 875° С

(растворением) карбидов хрома, железа, титана, вольфрама, ниобия и интерметаллидов типа $Ni_3(Al, Ti)$. Исключение составляют аустенитно-ферритные стали типа Х25Н13 (Х23Н13, Х20Н14С2, 0Х20Н14С2, Х25Н13Т2), которые могут содержать до 12—15% феррита, а также некоторые сплавы на основе хрома и никеля с содержанием хрома более 40—65% [92]. Стали и сплавы этой группы применяются в виде литья, сортового проката, поковок, листа, ленты, а также проволоки.

Наибольшую пластичность жаростойкие аустенитные стали, сплавы и сварные швы приобретают после аустенизации при высоких температурах (1100—1200° С), табл. 23. При длительной эксплуатации в интервале температур 600—850° С пластичность их заметно снижается вследствие старения. Некоторые из них, например, Х23Н18, Х25Н20С2, в интервале температур 600—800° С подвержены сигматизации, в результате чего возрастает их прочность, а пластичность снижается. Периодический высокотемпературный нагрев (порядка 1000—1150° С)

23. Механические свойства и режимы термической обработки некоторых жаростойких аустенитных сталей [94] и сплавов [38]

Марка стали, сплава	Сортамент	Режим закалки	Механические свойства					
			НВ	$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ	ψ	$a_н$ в кГ·м/см²
				в кГ/мм²		в %		
Х23Н18 (ЭИ417)	Лист	1080–1150° С, охлаждение в воде или на воздухе	–	55	–	40	–	–
	Пруток	1100–1150° С, охлаждение на воздухе, в воде или масле	140–180	50	20	35	50	25
Х23Н13 (ЭИ319)	Лист и пруток		180–170	50	30	35	50	–
Х2ЛГ9С2 (ЭИ483)	Лист	1050–1100° С, охлаждение в воде или на воздухе	–	55		35	–	–
	Пруток	1000—1150° С, охлаждение на воздухе, в масле или воде	–	60	30	35	50	10
Х25Н6Г7АР (ЭИ836)	Лист	1100–1150° С, охлаждение на воздухе, в масле или воде	–	100	–	35	–	–
	Пруток		190–220	70	33	40	45	–
1Х2-НЭТР (ЭИ813)	Лист	1050–1100° С, охлаждение на воздухе или в воде	–	75	–	35	–	–
	Пруток	1100–1150° С, охлаждение на воздухе, в воде или масле	–	56	17	35	50	25
ХН60 (ЭИ868)	Литье	1150° С, охлаждение на воздухе	260–290	96	60	25	30	3–4
	Лист		–	102	69	30	38	5–6
4Х15Г14С10 (ЭИ77)	Лист	1100° С, охлаждение в воде	–	75	38	50	55	–

изделий, бывших в эксплуатации, позволяет частично восстановить пластичность металла. При такой термической обработке происходит растворение фаз (карбидов, интерметаллидов, σ фазы). Установлено, что легирование швов типа Х25Н15Г7 азотом (0,25—0,45%) и углеродом (0,18—0,25%) при одновременном незначительном ограничении в них хрома (до 19—22%) и кремния предотвращает их сигматизацию [36, 51].

Жаростойкие аустенитные стали и сплавы относятся к трудносвариваемым [1] вследствие повышенной склонности швов и околошовной зоны к горячим

[1] См. также гл. VII.

трещинам. Исключение составляет только небольшая группа двухфазных аустенитноферритных сталей типа Х25Н13 (0Х20Н14С2, Х20Н14С2, Х23Н13, Х25Н13Т) и высокохромистые эвтектические сплавы типа Х50Н50 (ЭИ668 и др.).

При сварке изделий повышенной жесткости и особенно из литых сталей и сплавов, например, 4Х18Н25С2, Х20Н13С2, Х25Н20С2, 3Х18Н35С2, 5Х28Н48В5, Х50Н50, ХН70Ю и др., легированных большими количествами кремния, углерода, алюминия, хрома, возможно образование холодных трещин. Предупреждение холодных трещин в шве и околошовной зоне достигается путем подогрева свариваемых кромок (или изделия в целом) до 250—550° С, а в ряде случаев и выше. Чем больше жесткость изделия и ниже пластичность свариваемого сплава и металла шва, тем выше должен быть подогрев.

Значительно сложнее задача предотвращения горячих трещин в шве и околошовной зоне. Высокая прочность и жаростойкость большинства жаростойких аустенитных сталей и сплавов достигается легированием их кремнием, алюминием, углеродом, ниобием, титаном (Х25Н20С2, 4Х18Н25С2, 3Х18Н35С2,

24. Сварочная проволока для сварки

Марка сварочной проволоки	Химический					
	C не более	Mn	Si	S и P не более		Cr
Св-07Х25Н13	0.09	1,0—2,0	0,5—1,0	0.018	0.025	23,0—25,0
07Х25Н12Т (ЭП175)	0.09	1,5—2,5	0,3—1.0	0.020	0.035	24,0—27,0
06Х25Н12ТЮ (ЭП187)	0.08	До 0.8	0.6—1,0	0.020	0.030	24,0—27,0
08Х25Н12БТЮ (ЭП389)	0.10	До 0.8	0,6—1,0	0.020	0.035	24,0—26.0
4Х15Г14Ю (ЭП499)	0.40—0.50	13.0—15.0	До 0.6	0.03	0.04	14,0—16,0
4Х15Г14СЮ (ЭП577)	0.40—0,50	13.0—15,0	1,2—1,8	0.03	0.04	14,0—16.0
Св-13Х25Н18	0.15	1.0—2,0	До 0.5	0.018	0.025	24,0—27.0
Св-25Х25Н16Г7	0.20—0.28	6.0—8,9	» 0.3	0.018	0.025	24,0—27.0
20Х22Н15Г7АТ (ЭП155)	0.18—0.25	6.0—8.0	» 0.35	0.020	0.030	19,0—22.0
08Х25Н20С2Р1 (ЭП532)	0,10	До 1.5	2,5—3,0	0.020	0.030	24,0—27,0
ХН50 (ЭП668)	0,05	До 0,3	До 0.3	0,015	0,015	46,0—50,0

5Х28Н48В5, ХН38ВТ, ХН70Ю и др.), которые в определенных концентрациях являются возбудителями горячих трещин в аустенитных швах. Поэтому для предотвращения горячих трещин в швах сварщики вынуждены прибегать к изменению композиции металла шва часто даже в ущерб его жаростойкости и другим характеристикам. Например, для сварки сталей Х25Н20С2, 4Х18Н25С2 и сплава 3Х18Н35С2 применяют электроды марки ОЗЛ-9-1 (тип наплавленного металла 4Х25Н17Г6). Предотвращение горячих трещин в швах, выполненных этими электродами, достигается путем легирования их углеродом (0,25—0,4%) и марганцем (5—7%) при одновременном ограничении в них кремния до 0,5%, что снижает жаростойкость шва и его стойкость против науглероживания по сравнению со свариваемыми сталями и сплавами.

Получение высококачественных сварных соединений в значительной мере зависит от того, насколько правильно назначена технология сварки изделия.

С целью обеспечения требуемой жаростойкости сварного соединения необходимо добиваться воспроизведения композиции свариваемого металла в металле

жаростойких сталей и сплавов

состав в %		Номер стандарта	Марка свариваемой стали
Ni	Другие элементы		
12.0—14,0	—	ГОСТ 2246—60 *	Х23Н13 (ЭИ319), Х20Н14С2 (ЭИ211), Х25Н13ТЛ, 0Х20Н14С2 (ЭИ732) и им подобные
11,0—13,0	0,6—1,0Ti	ЧМТУ/ЦНИИЧМ 183—59	Х23Н18 (ЭИ417), 4Х18Н25С2 и им подобные, работающие при 900—1100° С; 4Х15Г14Ю (ЭИ499), 4Х15Г14СЮ (ЭИ577) и им подобные
11,5—13,5	0,6—0,9Ti 0,4—0,8Al	ЧМТУ 1-469-68 группа В05	
12.0—14.0	0.5—0.9Ti 0.7—1.1Nb 0.4—0.9Al	ЧМТУ 1-634-69 группа В15	
До 0,5	1.2—1.8Al	—	4Х15Г14Ю (ЭИ499) и ей подобные
До 0,5	1,2—1,8Al	—	4Х15Г14Ю (ЭИ499), 4Х15Г14СЮ (ЭИ577) и им подобные, работающие при 800—900° С
17,0—20.0	—	ГОСТ 2246—60 *	Х23Н18 (ЭИ417), Х25Н16Г7АР (ЭИ835) и им подобные, работающие при 1000—1050° С
15.0—17,0	—	ГОСТ 2246—66 *	
14,0—16.0	0.6—1.6Ti 0.25—0.45N_2	ЧМТУ/ЦНИИЧМ 275—60	
18.0—21,0	0.4—0.7B	ЧМТУ 1-805-69	Х25Н20С2 (ЭИ283), 3Х18Н35С2, 5Х28Н48В5 и им подобные, работающие при температуре до 1100° С, в том числе и в науглероживающих средах
48,0—54,0	До 1,0Fe	—	ХН50 (ЭИ668), ХН35ВЮ (ЭИ468), а также Х25Н20С2 (ЭИ283); сплавы 3Х18Н35С2, 4Х28Н48В5 и им подобные, работающие при температурах до 1200° С

шва. Сравнительно нетрудно этого достичь при сварке тонколистовых сталей и сплавов, например, Х23Н18, Х25Н16Г7АР, 1Х25Н25ТР, ХН38ВТ, которые в малых толщинах удовлетворительно свариваются дуговой сваркой, контактной и др. В ряде случаев этому условию удовлетворяет электрошлаковая сварка проволочным и пластинчатым электродами.

В случае применения присадочных материалов, отличающихся по химическому составу от свариваемой стали (сплава), во избежание образования горячих трещин в металле шва нужно стремиться к минимальному разбавлению металла шва основным металлом. Чем крупнозернистее свариваемый металл, тем более склонен он к околошовным горячим трещинам. Особенно подвержены этому виду дефектов литые стали и сплавы [53, 95]. Эффективными средствами борьбы с околошовными горячими трещинами являются:

1) повышение чистоты свариваемых сталей и сплавов путем выплавки их на чистых шихтовых материалах или рафинирования, например, электрошлаковым переплавом, вакуумно дуговым и др. [53];

2) применение вместо литых сталей и сплавов деформированных (катаных, кованых, прессованных и т. д.) мелкозернистых. Оптимальной является величина зерна, оцениваемая 4—8 баллами;

3) для измельчения структуры в околошовной зоне рекомендуется чеканка (наклеп) кромок, подлежащих сварке, на глубину 2—5 *мм*.

Отливка жаростойких сталей и сплавов в земляные формы приводит к сильному загрязнению металла примесями (серой, фосфором и др.) и включениями, которые снижают пластичность металла, а при сварке способны вызвать трещины. Для отливок (особенно крупных) характерна также недостаточная плотность металла, повышенное содержание газов и наличие несплошности в виде литейных рыхлостей, пор, раковин. При сварке литья с такими дефектами возможно образование трещин и пор в сварных швах и по линии сплавления. В связи с этим необходима тщательная зачистка литого металла в месте сварки до полного удаления дефектов.

Сварные соединения из жаростойких аустенитных сталей и сплавов желательно подвергать аустенизации при 1100—1200° С или высокотемпературному отжигу при 900—950° С для снятия сварочных напряжений.

Дуговая сварка жаростойких аустенитных сталей и сплавов производится постоянным током обратной полярности (плюс на электроде); сварка неплавящимся вольфрамовым электродом в аргоне (гелии) — током прямой полярности (минус на электроде), электрошлаковая — на переменном токе. Остальные требования в части оборудования, источников питания, режимов и техники сварки при сварке жаростойких аустенитных сталей и сплавов такие же, как и при сварке жаропрочных аустенитных сталей и сплавов.

Технология сварки

Наибольшее применение получила ручная дуговая сварка покрытыми электродами и в нейтральных защитных газах (аргоне, гелии). Применяется также механизированная сварка под флюсом, контактная точечная, шовная, электрошлаковая и др.

Сварка под флюсом. Сварку жаростойких сталей двухфазными аустенитно-ферритными проволоками типа Х25Н13 (Св 07Х25Н13, 07Х25Н12Т, 06Х25Н12ТЮ, 08Х25Н12БТЮ) рекомендуется выполнять под низкокремнистыми флюсами АН-26, АНФ-14, АНФ-16, 48-ОФ-10. В случае сварки стабильноаустенитными проволоками, например, Св-25Х25Н16Г7, Св 13Х25Н18, 20Х22Н15Г7АТ и др., и проволоками, содержащими легкоокисляющиеся элементы: алюминий, титан, бор и др., следует применять нейтральные фторидные флюсы АНФ-5, АНФ-23, 48-ОФ-6.

Высокую стойкость против горячих трещин при сварке чистоаустенитными швами обеспечивают фторидный бористый флюс АНФ-22 (система CaF_2—B_2O_3)

и фторидный карбидный флюс АНФ 8К (система CaF_2—Al_2O_3—Ca_2C) [60, 61]. При сварке под флюсом АНФ 22 происходит легирование металла шва бором в пределах 0,2—0,45%, а под АНФ 8К — углеродом до 0,1—0,2%. Составы сварочных проволок, флюсов и ориентировочные режимы сварки некоторых наиболее употребляемых жаростойких аустенитных сталей и сплавов приведены в табл. 24, 10 и 25. Флюсы перед употреблением рекомендуется прокаливать при 500—900° С в течение 1—2 *ч*.

Сварка в среде защитных газов. В качестве защитных газов применяют аргон, гелий, углекислый газ, азот и смеси, например, аргон с 3—5% кислорода, аргон с углекислым газом и т. д. Сварку швов, содержащих легкоокисляющиеся элементы: алюминий, титан, следует выполнять в атмосфере нейтральных газов (аргона, гелия).

Сварочные проволоки (табл. 24) могут быть использованы и для полуавтоматической сварки, а также в качестве присадки при ручной сварке. В качестве присадки для ручной газоэлектрической сварки может применяться проволока

25. Ориентировочные режимы механизированной сварки жаростойких аустенитных сталей и сплавов под флюсом и в защитных нейтральных газах

Марка сварочной проволоки	Защитная среда	Рекомендуемый диаметр сварочной проволоки в *мм*	Режимы сварки				Структура металла шва
			Ток в *а*	Напряжение дуги в *в*	Скорость сварки в *м/ч*	Расход газа в *л/мин*	
Св-07Х25Н13	Флюсы: АНФ-14, АН-26, 48-ОФ-10, АНФ-16	2 3 4	180—300 250—350 350—450	26—30 28—35 30—36	15—40 15—30 15—30	— — —	Аустенитно-ферритная
	Аргон, гелий, углекислый газ	0,8; 1,0 1,2; 1,6	60—150 100—250	18—22 19—26	10—30 10—40	7,0—10 8—10	
Св-13Х25Н18, Св-25Х25Н16Г7АХ, 10Х22Н15Г7АТ (ЭП155)	Флюсы: АНФ-5, АНФ-23, 48-ОФ-6	2 3	200—280 250—350	25—28 28—30	15—42 15—42	— —	Аустенитно-карбидная
4Х14Г14Ю (ЭП593) 4Х15ГЧСЮ (ЭП577)	Аргон Гелий	0,8; 1,0 1,2; 1,6	60—150 100—250	18—22 19—26	10—30 10—30	7—10 8—12	
08Х25Н20С2Р1 (ЭП532)	Флюсы: АНФ-23, АНФ-22, 48-ОФ-6	2 3	200—250 250—300	24—30 27—32	15—30 15—30	— —	Аустенитно-боридная
	Аргон, гелий, углекислый газ	1,2; 1,6	100—250	19—26	10—40	8—12	
ХН50 (ЭП668)	Флюсы: АНФ-23, АНФ-5, АНФ-6	2 3	180—300 250—350	26—30 28—35	15—40 15—30	— —	Аустенит + хромоникелевая эвтектика
	Аргон, гелий	1,2; 1,6	100—250	19—26	10—40	8—12	

26. Электроды для сварки жаростойких аустенитных сталей и сплавов

Марка электрода	Тип электрода по ГОСТу 10052—62	Марка сварочной проволоки и номер стандарта	Наплавленный металл		Марка свариваемой стали сплава
			Тип	Структура	
ОЗЛ-2	ЭА-2М2	Св-10Х20Н15 ГОСТ 2246—60 *	1Х21Н14М2	Аустенитно-ферритная. содержание α-фазы не нормируется	Типа Х23Н13 (ЭИ319), Х25Т, Х28, работающие при температурах выше 850° С в газовых средах, содержащих сернистые соединения
ОЗЛ-4	ЭА-2	Св-10Х20Н15 ГОСТ 2246—60 *	12Х25Н13	Аустенитно-ферритная, 2,5—8% α-фазы	Типа Х23Н13 (ЭИ319), Х23Н18 (ЭИ417), 4Х18Н25С2, работающие при температурах выше 850° С Жаростойкие хромистые Х25Т, Х28, Х28АН, а также малоуглеродистые и низколегированные с аустенитными Жаростойкие хромомарганцевые типа 4Х15Г14Ю (ЭИ499) 4Х15Г14С10 (ЭИ577)
ОЗЛ-6	ЭА-2	Св-07Х25Н13 ГОСТ 2246—60 *	1Х25Н13	Аустенитно-ферритная, 2,5—10% α-фазы	
ЦЛ-25	ЭА-2	Св-07Х25Н13 ГОСТ 2246—60 *	1Х25Н13	Аустенитно-ферритная, 3—9% α-фазы	
ОЗЛ-5	ЭА-2С2	Св-10Х20Н15 ГОСТ 2246—60 *	1Х24Н14С2	Аустенитно-ферритная, 3—10% α-фазы	Типа Х20Н14С2 (ЭИ211), 0Х20Н14С2 (ЭИ732), Х25Н20С2 (ЭИ283), работающие при температурах 900—1100° С
ЦТ-17	ЭА-2С2	Св-10Х20Н15 ГОСТ 2246—60 *	1Х25Н14С	Аустенитно-ферритная, 3—5% α-фазы	Типа Х20Н14С2 (ЭИ211), работающие при температурах 900—1000° С
ГС-1	—	Св-08Х20Н10Г6 ГОСТ 2246—60 *	1Х25Н9Г6С3	Аустенитно-ферритная; содержание ферритной фазы ≥ 10%	Типа Х20Н14С2 (ЭИ211), работающие при температурах выше 900° С. Для сварки первого слоя при многослойной сварке сталей типа Х25Н20С2 (ЭИ283), работающих при температурах до 1050° С, в том числе и в науглероживающих средах

ОЗЛ-9	ЭА-2Г6	Св-13Х25Н18 ГОСТ 2246—60 *	20Х25Н17Г6	Аустенитно-карбидная	Типа Х23Н13 (ЭИ319), Х23Н18 (ЭИ417), 4Х18Н25С2, работающие при температурах до 1050° С, когда к металлу шва предъявляют требования повышенной стойкости против охрупчивания
ОЗЛ-9А	ЭА-2Г6	Св-25Х25Н16Г7 ГОСТ 2246—60 *	30Х25Н16Г7	Аустенитно-карбидная	Типа Х23Н13 (ЭИ319), Х23Н18 (ЭИ417), работающие в окислительных и науглероживающих средах при температурах до 1050° С
ОЗЛ-18	ЭА-2Г6	Св-25Х25Н16Г7 ГОСТ 2246-60 *	4Х25Н16Г7	Аустенитно-карбидная	Типа Х25Н20С2 (ЭИ283), 4Х18Н25С2 и сплава 4Х18Н35С2, работающие при температурах до 1100° С, в сочетании с аустенитно-ферритными электродами ГС-1 или ОЗЛ-5, которыми заваривают первый слой шва
ОЗЛ-9-1	ЭА-2Г6	Св-13Х25Н18 ГОСТ 2246- 60 *	40Х25Н17Г6	Аустенитно-карбидная	Типа Х25Н20С2, 4Х18Н25С2, работающие при температурах до 1050 С, когда к металлу предъявляют требования жаростойкости и жаропрочности
ОЗЛ/АНИИ-16	ЭА-2С2Р1	Св-13Х25Н18 ГОСТ 2246—60 *	1Х25Н18С2Р1	Аустенитно-боридная	Жаростойкие стали типа Х25Н20С2 (ЭИ283), 4Х18Н25С2, сплавы 4Х18Н35С2, работающие при температурах при 1100° С и в науглероживающих средах
ЦЧМ-3	—	ХН60В (ЭИ868), ЧМТУ/ЦНИИЧМ 524—61	1Х25Н55В14М	Аустенитная	Жаростойкие сплавы типа ХН78Т (ЭИ435), ХН60В (ЭИ868)

27. Технологические особенности электродов для сварки жаростойких аустенитных сталей и сплавов

Марка электрода	Режим прокалки электрода перед сваркой		Сварочный ток в *а* при сварке в нижнем положении электродами диаметром в *мм*				Коэффициент наплавки в *г/а·ч*	Расход электродов на 1 *кг* наплавленного металла	Возможное положение электрода при сварке	Характерные особенности
	Т в °С	Время в *мин*	2	3	4	5				
ОЗЛ-2	300	40	30—50	60—80	110—130	150—160	12	1,59	Любое	Металл шва обладает повышенной устойчивостью против горячих трещин
ОЗЛ-4	300	60	30—50	60—80	110—130	140—160	12	1,43	Любое	Наплавленный металл в интервале температур 600—800° С склонен к сигматизации. Средняя скорость окисления за 100 *ч* при 1050° С 0,4 *г/м²ч*
ОЗЛ-6	300	60	30—50	60—80	120—140	140—160	11,5	1,6	Любое	Сварка короткой дугой. Наплавленный металл в интервале температур 600—800° С склонен к сигматизации
ЦЛ-25	350—400	90	—	80—100	110—140	150—180	10,5	1,8	Любое	Сварка валиками шириной не более трех диаметров электрода
ОЗЛ-6	300	60	30—50	60—80	110—130	140—160	12,5	1,46	Любое	Сварка короткой дугой. Металл шва не склонен к науглероживанию. В интервале температур 600—800° С подвержен сигматизации

ЦТ-17	350—400	90	30—50	60—80	110—130	140—160	10,5	1,9	Любое	Сварка валиками шириной не более трех диаметров электрода. Кратеры должны заплавляться частыми короткими замыканиями электрода
ГС-1	300	40	30—50	70—90	110—130	—	12	1,46	Любое	Наплавленный металл стоек против науглероживания
ОЗЛ-9	300	60	30—50	70—90	110—130	140—160	13,5	1,52	Нижнее, вертикальное, потолочное	Сварка короткой дугой с обязательным заплавлением кратеров
ОЗЛ-9А	300	60	30—50	70—90	110—130	—	13,5	1,5	Нижнее, вертикальное, ограничено в потолочном	Электроды имеют некоторую склонность к образованию трещин при сварке жестких изделий. Сварку жестких изделий рекомендуется производить электродами диаметром 3 мм. Заплавка кратеров обязательна
ОЗЛ-18	300	60	30—50	70—90	110—130	—	—	-	Нижнее, вертикальное, потолочное	Сварка короткой дугой точечными швами с обязательной заплавкой кратеров
ОЗЛ-9-1	300	60	-	70—90	110—130	140—160	13,5	1,52	Нижнее	Сварку жестких изделий рекомендуется производить точечными швами
ОЗЛ АНИК-16	300	60	—	60—80	110—130	140—160	14,8	1,38	Нижнее, вертикальное	Металл шва обладает повышенной стойкостью против горячих трещин, в том числе при сварке жестких конструкций. Кратеры подлежат заплавке. Сварку жестких изделий рекомендуется производить с подогревом свариваемых кромок (изделий) до температуры выше 250—300 С
НЧМ-3	200—250	60	—	95—110	130—150	—	13,5	1,4	Нижнее, вертикальное	Сварка точечными швами. Наплавленный металл жаростоек до 1050 С

28. Типичный химический состав металла, наплавленного электродами для сварки жаростойких сталей и сплавов (в %)

Марка электродов	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Другие элементы
				не более				
ОЗЛ-2	0.10	1.6	0.50	0.035	0.020	21,0	14.5	2,0Mo
ОЗЛ-4	0.12	1.5	0.50	0.030	0.020	25,0	13,0	—
ОЗЛ-6	0,10	1.2	0.55	0.030	0.020	25,5	12.5	—
ЦЛ-25	0.09	2.0	0.80	0.030	0.020	25,0	12.0	—
ОЗЛ-5	0.10	1.5	1.75	0.030	0.020	23.5	14.0	—
ЦТ-17	0.08	1.3	1.10	0.030	0.020	26.0	14.5	—
ГС-1	0.10	6.0	2.40	0.040	0.020	25.0	9.2	—
ОЗЛ-9	0,20	6.0	0.35	0.035	0.020	24.5	17.5	—
ОЗЛ-9А	0.22	6.5	0.35	0.035	0.020	24.5	16.0	—
ОЗЛ-18	0.35	7,0	0.35	0.020	0.020	24.5	16.0	—
ОЗЛ-9-1	0.35	6,0	0.35	0,020	0.020	24.5	17,5	—
ОЗЛ / АНЖ-16	0.10	2.0	2.2	0.030	0.020	24,5	18.0	0.5B
ЦЧМ-3	0.05	0.30	0.40	0,010	0,010	23,0	Основа	13.5W; 0.5Mo

29. Типичные механические свойства металла швов, выполненных жаростойкими электродами (без термической обработки)

Марка электродов	σ_T	$\sigma_в$	δ в %	$a_н$ в *кГм/см²*	Марка электродов	σ_T	$\sigma_в$	δ в %	$a_н$ в *кГм/см²*
	в *кГ/мм²*					в *кГ/мм²*			
ОЗЛ-2	33	53	38	12	ОЗЛ-9	37	60	31	13
ОЗЛ-4	35	58	33	12	ОЗЛ-9А	—	67	32	11
ОЗЛ-6	35	57	33	10	ОЗЛ-18	50	65	12	5
ЦЛ-25	30	55	25	9	ОЗЛ-9-1	50	65	12	5
ОЗЛ-5	35	60	25	6	ОЗЛ / АНЖ-16	50	65	5	2.5
ЦТ-17	30	60	20	2					
ГС-1	48	65	18	5	ЦЧМ-3	36	52	20	13

других размеров, а также, как исключение, прутки («лапша»), нарезанные из свариваемого сплава.

Ручная сварка покрытыми электродами. Сварка наибольшее применение получила при изготовлении изделий из жаростойких сталей, сравнительно меньше — из сплавов. Рекомендуемые марки электродов для сварки жаростойких аустенитных сталей и сплавов приведены в табл. 26, режимы сварки и некоторые технологические особенности — в табл. 27, типичный химический состав и механические свойства наплавленного металла — в табл. 28 и 29.

Сварку покрытыми электродами рекомендуется выполнять ниточными швами (без колебаний) короткой дугой на постоянном токе обратной полярности (плюс на электроде). Электрод диаметром 3 *мм* с точки зрения стойкости швов против горячих трещин следует считать оптимальным. Обязательной является заплавка кратеров частыми короткими замыканиями. Во всех случаях сварка покрытыми электродами производится с минимальным проплавлением основного металла. В остальном техника сварки и подготовка кромок такая же, как и при сварке жаропрочных аустенитных сталей и сплавов.

Электрошлаковая сварка. Сварку выполняют по двум вариантам: проволокой и пластиной. Диаметр проволоки 3 *мм*, толщина пластины 8—10 *мм*, а ширина равна толщине свариваемого сплава. Проволоку для улучшения продвижения в мундштуке желательно подвергать незначительной нагартовке (20—30%).

Сварка производится с использованием фторидных неокислительных флюсов АНФ-1П, АНФ-7, АНФ-8 и высокоосновного АН-292. В случае сварки двухфазными аустенитно-ферритными швами типа Х25Н13 возможно применение также низкокремнистых флюсов АНФ-14 и АН-26. Режимы и техника электрошлаковой сварки жаростойких аустенитных сталей и сплавов примерно такие же, как и углеродистых низколегированных и жаропрочных сталей.

При электрошлаковой сварке малопластичных литых жаростойких сталей и сплавов, легированных кремнием или кремнием и углеродом, например, Х25Н20С2, 4Х18Н25С2, 3Х18Н35С2, 5Х28Н48В5 и др., возможно образование трещин в околошовной зоне, поэтому этот способ сварки для них малоприемлем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алов А. А. Основы теории процессов сварки и пайки. М., «Машиностроение», 1964.
2. Акимов Г. В. Основы учения о коррозии и защите металлов. М., Металлургиздат, 1946.
3. Архаров В. И., Горбунов К. М. Кристаллографическая упорядоченность взаимодействия газов с металлами и развитие принципа ориентационного и размерного соответствия П. Д. Данкова. Сб. «Механизм взаимодействия металлов с газами». М., «Наука», 1964.
4. Архаров В. И. и др. Труды Института физики, УФАН СССР. вып. 19, 1958.
5. Биндер У. Сплавы железа с хромом и никелем и другие жаростойкие стали. Коррозия металлов. Кн. вторая, часть 3. Госхимиздат, 1952.
6. Веденкин С. Г., Максимов А. П., Сорокин П. В. Коррозия металлов в продуктах сгорания тяжелого топлива. Труды ЦНИИТМАШ. кн. 22, 1961.
7. Герасимов В. В. и др. Коррозия и облучение. М., Госатомиздат, 1960.
8. Горин И. Г. Опыт сварки литой стали ЭИ319Л. «Сварочное производство», 1962, № 5.
9. Грибоедова Т. С., Лазарев Б. И., Федорцов-Лутиков Г. П. Новая аустенитная сталь ЭИ117 (1Х16Н14В2БР) для труб проводов и пароперегревателей установок, работающих при 650—700°С. Труды ЦНИИТМАШ, 1960, № 9.
10. Гудремон Э. Специальные стали. М., «Металлургия», 1966.
11. Дятлов В. И., Сидорук В. С. Влияние технологических условий сварки на чувствительность к образованию горячих трещин. «Автоматическая сварка», 1965, № 10; 1966, № 3.
12. Дятлова В. Н. Коррозионная стойкость металлов и сплавов. Справочник. М., «Машиностроение», 1964.
13. Еремин А. А., Жук Н. П. и др. Влияние газовой среды на свойства окалины нержавеющих сплавов. Коррозия и защита сталей. М., Машгиз, 1959.
14. Ерохин А. А., Кузнецов О. М. Электроды с безокислительным покрытием. «Сварочное производство», 1959, № 12.
15. Железнякова Ш. Р., Щур Н. Ф. Окалиностойкие и жаропрочные сплавы в цементационной атмосфере. «Металловедение и термическая обработка металлов», 1962, № 7.
16. Заруба И. И. Сварка в углекислом газе. Киев, 1960.
17. Зайдман М. Е. Опыт работы лаборатории металлов и сварки. Сб. «Опыт эксплуатации Черепетской ГРЭС». Энергоиздат, 1959.
18. Земзин В. Н., Станюкович А. В. Склонность сварных соединений аустенитных сталей к локальным разрушениям в околошовной зоне при высоких температурах. «Автоматическая сварка», 1961, № 7.
19. Земзин В. Н., Френкель Л. Д. Сварные конструкции паровых и газовых турбин. М. — Л., Машгиз, 1962.
20. Каховский Н. И. Сварка нержавеющих сталей. Киев, 1968.
21. Коломбье К., Гохман И. Нержавеющие и жаропрочные стали. М., Металлургиздат, 1958.
22. Кубашевский О., Гопкинс Б. Окисление металлов и сплавов. М., ИЛ, 1955.
23. Кырченов В. В. Электродуговая сварка жаропрочной аустенитной стали типа 15-35. «Автоматическая сварка», 1958, № 5.
24. Коррозионная и химическая стойкость материалов. Справочник. Под ред. Н. А. Долежаля. М., Машгиз, 1954.
25. Лазарев Б. И., Русинова И. Н. Электроды для сварки трубных жаропрочных сталей. Сб. «Вопросы сварки в энергомашиностроении». Под ред. Л. М. Яровинского, кн. 104. М., Машгиз, 1962.
26. Лашко Н. Ф., Лашко-Авакян С. В. Металловедение сварки. М., Машгиз, 1954.

27. Левин Е. Е. и др. Литая экономнолегированная сталь ЭИ402М-Л для деталей турбин и арматуры с рабочей температурой металла 650° С. «Энергомашиностроение», 1963, № 1.
28. Либерман Л. И., Нейхис М. И. Справочник по свойствам сталей, применяемых в котлотурбостроении. М. — Л., Машгиз, 1958.
29. Любавский К. В. Металлургия сварки сталей плавлением. НТО Машпром. М., 1961.
30. Любавский К. В. Свариваемость жаропрочных аустенитных сталей. Труды Всесоюзного совещания по проблемным вопросам сварки. Ч. 1. НТО Машпром. М., 1958.
31. Любавский К. В., Лазарев Б. П. Электроды для сварки стали ЭИ257. «Сварочное производство», 1956, № 7.
32. Любавский К. В., Львова Е. Н., Герман С. И. Сварка корпуса газовой турбины из жаропрочной глубокоаустенитной стали. «Сварочное производство», 1966, № 9.
33. Любавский К. В. и др. Влияние неоднородности прочностных свойств сварных соединений на склонность их к локальному разрушению. «Сварочное производство», 1965, № 3.
34. Любавский К. В., Никитин Ю. М. Влияние термического цикла сварки на свойства аустенитных жаропрочных сталей. Сб. «Новые проблемы сварочной техники». Киев, 1964.
35. Любавский К. В., Никитин Ю. М. О локальном разрушении сварных соединений на аустенитных паропроводах. «Автоматическая сварка», 1960, № 7.
36. Любавский К. В., Пашуканис Ф. И. Некоторые особенности сварки литых аустенитных сталей. «Сварочное производство», 1955, № 9.
37. Любавский К. В., Тимофеев М. М., Никитин Ю. М. О причинах возникновения кольцевых околошовных трещин в сварных соединениях паропроводов из аустенитных сталей. Сб. «Материалы совещания по применению сварки в производстве турбин». ГОСНИТИ, М., 1964.
38. Любавский К. В., Тимофеев М. М. Сварка аустенитных жаропрочных сталей. НТО Машпром. 1969.
39. Любавский К. В., Торопов В. А. К вопросу образования горячих трещин при дуговой сварке аустенитных сталей. Сб. под ред. К. В. Любавского, «Новое в технологии сварки». М., Машгиз, 1955.
40. Львова Е. Н. Сварка глубокоаустенитной стали ЭП126. «Сварочное производство», 1963, № 8.
41. Львова Е. Н., Любавский К. В. Электродуговая сварка глубокоаустенитной стали ЭИ725 (Х15Н35В5). Вопросы сварки в энергомашиностроении. Кн. 104. М., Машгиз, 1962.
42. Мартын В. М., Чекотило Л. В. Высокохромистые аустенитные сплавы (литературный обзор). «Автоматическая сварка», № 8.
43. Минкевич Н. А. Термическая обработка стали и чугуна. Ч. I, II. М., 1932.
44. Михайлов-Михеев П. Б. Справочник по металлическим материалам турбино- и моторостроения. М. — Л., Машгиз, 1961.
45. Мовчан Б. А. Взаимосвязь физической микронеоднородности с горячими трещинами при сварке. «Сварочное производство», 1962, № 4.
46. Мовчан Б. А. Микроскопическая неоднородность в литых сплавах. ГИТЛ УССР, Киев, 1962.
47. Моисеев А. А., Зотин И. М. Поведение сталей ЭП184 (тип ЭИ713, ЭИ695Р и ЭИ17) в эксплуатационных условиях. «Теплоэнергетика», 1964, № 3.
48. Медовар Б. И. Сварка жаропрочных аустенитных сталей и сплавов. М., «Машиностроение», 1966.
49. Медовар Б. И. Сварка хромоникелевых аустенитных сталей. М., Машгиз, 1958.
50. Медовар Б. И. Новые марки проволок для сварки высоколегированных сталей и сплавов. «Автоматическая сварка», 1961, № 5.
51. Медовар Б. И. Сварка аустенитных сталей и сплавов. Киев, «Техника», 1964.
52. Медовар Б. И. Сварка хромоникелевых аустенитных сталей. М., Машгиз, 1958.
53. Медовар Б. И. Сварка жаропрочных аустенитных сталей и сплавов. «Машиностроение», 1966.
54. Медовар Б. И., Луцюк-Худин В. А. К вопросу о локальном разрушении сварных соединений аустенитных сталей. «Автоматическая сварка», 1961, № 12.
55. Медовар Б. И., Пинчук Н. И. Предотвращение охрупчивания аустенитных сварных швов типа 25-20. «Автоматическая сварка», 1962, № 10.
56. Медовар Б. И. и др. Легирование бором жаропрочных аустенитных сталей, сплавов и сварных швов в пределах 0,3—1,5%. «Автоматическая сварка», 1962, № 5.
57. Медовар Б. И., Чекотило Л. В., Павлийчук Г. А. Легирование бором в количестве 0,2—0,7% жаростойких аустенитных сталей типа Х25Н20С2. Сб. «Свойства и применение жаропрочных сплавов». М., «Наука», 1966.
58. Медовар Б. И., Чекотило Л. В., Артамонов В. Л. Новые электроды аустенитно-боридного типа для сварки аустенитных сталей. Сб. «Тезисы докладов Всесоюзной конференции по электродному производству». Киев, 1966.
59. Медовар Б. И., Чекотило Л. В. и др. Легирование бором (более 0,3—0,4%) жаропрочных аустенитных сталей и сварных швов. Исследования по жаропрочным сплавам. Т. 10, ИМЕТ, 1963.
60. Медовар Б. И., Чекотило Л. В., Герман С. И. Фтористый борисый флюс для дуговой и электрошлаковой сварки аустенитных сталей и сплавов. «Сварочное производство», 1965, № 9.

61. Мотовар Е. И., Чекотило Л. В., Кумыш И. И. Плавленые карбидные флюсы для сварки стабильноаустенитных сталей и сплавов. «Сварочное производство», 1967, № 8.

62. Металлы и сплавы в химическом машиностроении. Труды НИИХИММАШ. Под ред. И. И. Юкалова. Вып. 40, 1962.

63. Патон В. Е., Потапьевский А. Г., Подола Н. В. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом с программным регулированием процесса. «Автоматическая сварка», 1964, № 1.

64. Пашуканис Ф. И., Рунов А. Е. Исследование свойств металла, наплавленного некоторыми жаропрочными электродами. «Сварочное производство», 1960, № 2.

65. Петров Г. Л., Ефимов Л. А. О выборе электродов для сварки стали ЭИ417 (Х23Н18) небольшой толщины. «Энергомашиностроение», 1951, № 6.

66. Петров Г. Л., Земзин В. Н., Гонсеровский Ф. Г. Сварка жаропрочных *нержавеющих* сталей. М.—Л., Машгиз, 1963.

67. Петров Г. Л., Субач А. Н. Разработка безокислительных электродных покрытий для сварки сталей, содержащих легкоокисляющиеся элементы. «Сварочное производство», 1966, № 9.

68. Петров А. В., Славин Г. А. Автоматическая сварка тонколистовой стали импульсной дугой в среде аргона. «*Сварочное производство*», 1962, № 2.

69. Прозоровский Е. В., Петров Г. Л. Вопросы сварки аустенитных *хромоникелевых* сталей, легированных бором. «Автоматическая сварка», 1966, № 1.

70. Рунов А. Е. Исследование вопросов улучшения свариваемости и работоспособности сварных соединений литых аустенитных жаропрочных сталей. «Вопросы сварки в энергомашиностроении». ЦНИИТМАШ, Кн. 104, М., Машгиз, 1962.

71. Рунов А. Е. Электродуговая сварка аустенитных хромоникелевых сталей в энергомашиностроении (*обзор иностранной литературы*). ЦБИТИ, ЦНИИТМАШ, 1957.

72. Рунов А. Е., Пашуканис Ф. И., Любавский К. В. Некоторые вопросы сварки литой аустенитной стали 1Х20Н12Т. «Сварочное производство», 1958, № 8.

73. Рунов А. Е., Терешкович А. С. Аустенитно-ферритная сталь для *жестких* сварно-литых деталей паровых *турбин и арматуры. Структура* и свойства новых жаропрочных материалов. Кн. 105, М., 1962.

74. Русенян А. В., Шоршоров М. Х. Новые аустенитные электроды для сварки стали типа Х13Н18В2Б. «Сварочное производство», 1959, № 6.

75. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. М., Машгиз, 1951.

76. Сафонников А. Н. Электрошлаковая сварка *высоколегированных* сталей разных классов. «Сварочное производство», 1967, № 5.

77. Сафонников А. Н. Сварка металлов пластинчатыми электродами. Киев, «Техника», 1966.

78. Славинский М. П. Физико-химические свойства элементов. М., Металлургиздат, 1952.

79. Справочник по сварке. Под ред. Е. В. Соколова. Т. I. М., Машгиз, 1960 и т. II, М., 1962.

80. Справочник по сварке. Под ред. Е. В. Соколова. т. II. М., Машгиз, 1961.

81. *Стали с пониженным* содержанием никеля. Справочник. Под ред. М. В. Приданцева и Г. Л. Лившица. ЦНИИЧМ, Металлургиздат, 1961.

82. Строев В. С., Ворновицкий И. Н. Электроды для сварки окалиностойких сталей. «Сварочное производство», 1962, № 8.

83. Тимофеев М. М. Принципы разработки хорошо свариваемой аустенитной стали для энергетических *конструкций*. IX Московская научно-техническая конференция по итогам научных и производственных работ за 1963 год в области сварочного производства (тезисы докладов). Мос. Гор. Совет НТО, М., 1964.

84. Тимофеев М. М., Никитин Ю. М. О повышении надежности сварных соединений паропроводов из аустенитной стали. «Теплоэнергетика», 1965, № 8.

85. Тимофеев М. М., Чешев Н. И. *О выборе аустенитной* стали для изготовления сварных конструкций энергетических установок. «Энергомашиностроение», 1966, № 6.

86. Техника *высоких* температур. Сб. Под ред. Н. Э. Кэмпбелла. М., ИЛ, 1959.

87. Технология электрической сварки плавлением. Под ред. Б. Е. Патона. М.—Киев, Машгиз, 1962.

88. Торопов В. А. Свойства аустенитного шва типа 1Х15Н25М6 при высоких температурах. «Сварочное производство», 1959, № 1.

89. Торопов В. А., Мартьянов Г. И. Изготовление сварных роторов из аустенитной стали. «Энергомашиностроение», 1956, № 11.

90. Туфанов Д. Г. Коррозионная стойкость нержавеющих сталей. Справочник. М., «Металлургия», 1969.

91. Фантаева М. И., Тыкочинская Т. В. Исследования свойств металла промышленных труб из стали ЭП17. «Теплоэнергетика», 1965, № 3.

92. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы. М., «Металлургия», 1964.

93. Химушин Ф. Ф. Легирование, термическая обработка и свойства жаропрочных сталей и сплавов. Оборонгиз, 1962.

94. Химушин Ф. Ф. Нержавеющие стали. М., «Металлургия», 1967.

95. Чекотило Л. В., Артамонов В. Л., Орлов В. А. Сварка под флюсом жаростойкой аустенитной стали Х25Н20С2 и сплава Х18Н35С3. «Автоматическая сварка», 1966, № 7.

96. Чекотило Л. В., Герман С. Н., Левенберг Н. Е. Электрошлаковая сварка аустенитного жаропрочного сплава ЭП725 (ХН35ВТР). «Энергомашиностроение», 1966, № 7.

97. Шрейдер А. В., Дегтярева Г. Л. Газовая коррозия и жаростойкое легирование металлов. М., ЦИТЭИН, 1961.
98. Щедров К. П., Гакман Э. Л. Жаростойкие материалы. М., «Машиностроение», 1965.
99. Электроды для дуговой сварки и наплавки. Каталог. «Наукова думка», Киев, 1967.
100. Электрошлаковая сварка. Под ред. акад. Б. Е. Патона. Киев, Машгиз, 1959.
101. Яшунская Т. В. Электроды для сварки на переменном токе сталей типа 18-9. «Сварочное производство», 1964, № 11.
102. Kauhausen E., Kansmacher P., Sadowski S. The problem of welding high temperature service materials, British Welding Journal, 1960, 7, No 12, 693—707.
103. Mihalinec Franjo. Visokolegirana austenitna electroda baznog Karaktera koja topoljnjem daje var otporan na visoke temperature a sluzi za zavarivanje vatrootpornih celika, Югославский патент, 49/3, No 23336, 30. 09. 62.
104. Sternkopt J., Richter H. Abschmelzschweiselektroden für zunderbeständige Ni — Gr Legirungen, Neue Hütte, 1963, 8, No 2, S. 102—107.
105. Sadowski S. Das Verhalten austenitischer Stähle und Schweissverbindungen im Themperaturbereich von 700—1200°C, L. Schweisstechnik, 1965, No 9, S. 311—324.
106. Smith R. A. Elements de la composition des materiaux contenant du nickel gui inteviemnent dans la corrosion seche a haute temperature, Corros. et anticorros., 1964. 12, No 3 108—115.
107. Hopkins B. E. Der Widerstand von Legierunden gegen Hoch temperaturkorrosion durch Verbrennungsprodukte, Werkstoffe und Korrosion, 1965. 16, No 12, S. 1025 - 1033.
108. Moor R. L. Corrosion of furnace tubes by residual welding slag. Corrosion, 1960, No 1.
109. Pease G. R. Corrosion of Ni — Cr — Fe alloys by welding slags, The Welding Journal, 1956, No 9.
110. Swales G. L. Les progres recents des alliages a haute teneur en nickel resistant a la corrosion. Corros. et anticorros., 1961, No 7—8, 235—247.
111. Hauffe K. Oxydation von Metallen und Metallegierungen. Spr. Verlag, 1956.
112. Pospivšil R. Antikorosni a žaruvzdorné oceli, Praha, 1956.
113. Holinberg E. G. New alloys for extreme conditions, «Chem. Engng. Progr.», 1961, 57, No 4, 75—78.
114. Curran R. W., Rankin A. W., ASME, Paper No 56 — A, Nov. 1956.
115. Ljibavskij K. V., Zvaracsky Sbornik No 1, Bratislava, 1962.
116. Aslory F. E., Mithel B., Toft L. H., Weld Journal, No. 2, 1954.
117. Savage W. F., Aranson A. H., Weld. Journal, No. 2, 1966.

ГЛАВА VI

СВАРКА ВЫСОКОХРОМИСТЫХ МАРТЕНСИТНЫХ, МАРТЕНСИТНО-ФЕРРИТНЫХ И ФЕРРИТНЫХ СТАЛЕЙ

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА И КЛАССИФИКАЦИЯ СТАЛЕЙ

По влиянию хрома на положение γ-области в сплавах Fe—Cr (рис. 1), а также и в хромистых сталях, содержащих углерод, можно выделить три группы сплавов: 1) с $\gamma \rightleftarrows \alpha$-превращением; 2) без $\gamma \rightleftarrows \alpha$-превращения; 3) с частичным превращением.

Такая классификация несколько условна.

Хром, обладая бо́льшим сродством к углероду, чем железо, является карбидообразующим элементом в сталях. Типичными карбидами, обнаруживаемыми в хромистых сталях, являются $Cr_{23}C_6$ и Cr_7C_3, а также более сложные — с частичным взаимным замещением в карбидах железа и хрома — $(Fe, Cr)_3C$; $(Fe, Cr)_{23}C_7$ и $(Fe, Cr)_7C_3$. Карбиды хрома являются термически более стойкими, чем карбид железа, они растворяются медленнее и при более высоких температурах. В связи с этим при термической обработке для гомогенизации твердого раствора требуется высокая температура и более длительные выдержки (рис. 2).

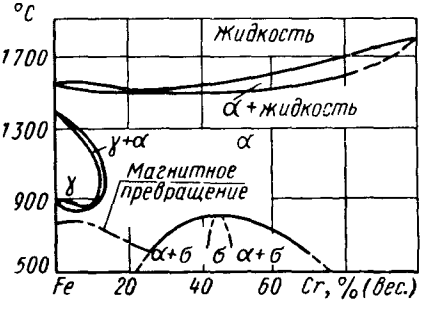


Рис. 1. Структурная диаграмма системы железо — хром

Температурная область существования γ-растворов в хромистых сталях значительно изменяется в зависимости от содержания в них хрома и углерода (рис. 3). Хромистые стали с содержанием углерода меньше 0,2% и хрома более 15—16% не имеют γ-фазы при любых температурах от комнатной до плавления и являются ферритными.

Наличие хрома в сталях значительно снижает критические скорости охлаждения в связи с замедлением процессов распада $\gamma \rightarrow \alpha$. В результате бездиффузионное превращение аустенита в мартенсит в хромистых сталях может быть получено при значительно меньшем содержании углерода, чем в простых углеродистых (рис. 4, *а*). При более высоком содержании хрома (рис. 4, *б*) устойчивость аустенита настолько высока, что даже при температуре его наименьшей устойчивости (примерно 700° С) для его распада требуется время около 300 *сек*. При непрерывном охлаждении, как это имеет место в условиях сварки, скорости охлаждения в области температур 800—650° С даже около 0,2° С/*сек* приводят к получению полностью мартенситной структуры. Оптимальные свойства, т. е. высокую прочность при достаточно высокой пластичности, такие стали получают после двойной термической обработки: закалки и высокого отпуска.

Кроме влияния на структуру и механические свойства при нормальных температурах, легирование сталей хромом приводит и к изменению ряда их физических свойств. Так хромистые стали в сравнении с углеродистыми имеют

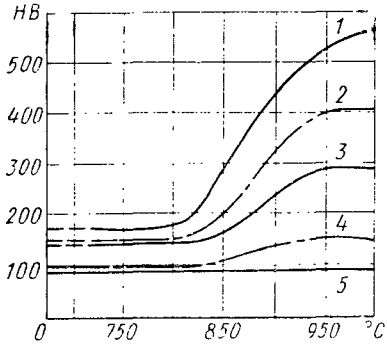


Рис. 2. Зависимость твердости хромистой стали от температуры нагрева и концентрации углерода [18]: *1* — 12% Cr, 0,35% C; *2* — 12% Cr; 0,12% C; *3* — 12% Cr, 0,05% C; *4* — 12% Cr, 0,01% C; *5* — 13% Cr, 0,01% C

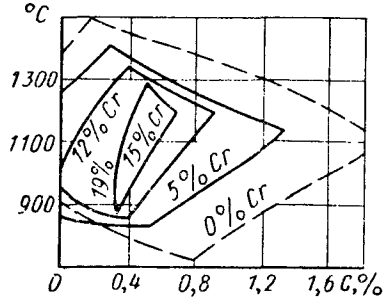


Рис. 3. Область существования γ-фазы в хромистой стали в зависимости от содержания углерода и хрома

меньшую теплопроводность, удельную теплоемкость и несколько меньший коэффициент теплового расширения [1]. Легирование хромом повышает коррозионную устойчивость сталей при воздействии атмосферы и ряда химически

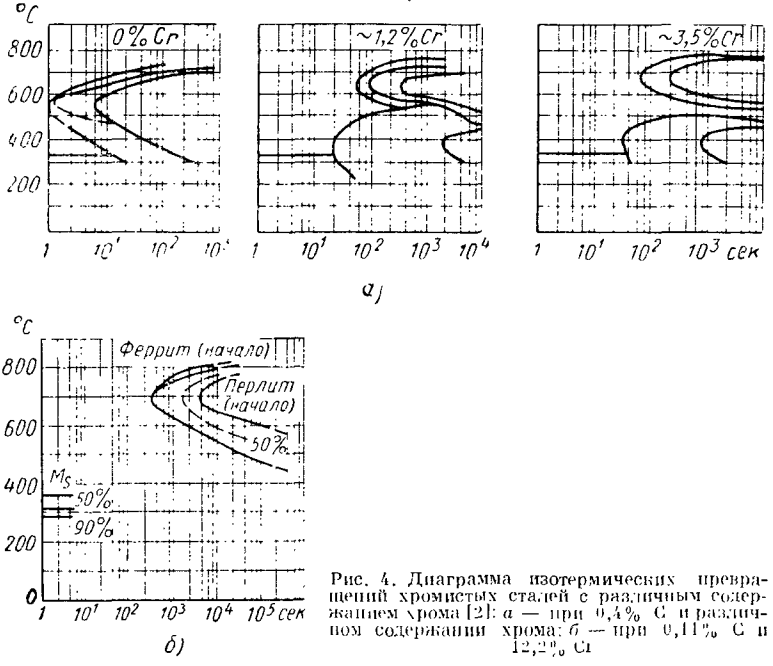


Рис. 4. Диаграмма изотермических превращений хромистых сталей с различным содержанием хрома [2]: *а* — при 0,4% C и различном содержании хрома; *б* — при 0,11% C и 12,2% Cr

агрессивных веществ, а также их окалиностойкость при повышенных температурах.

Легирование сталей хромом, особенно при дополнительном их легировании Mo, W, Nb и V, увеличивает сопротивление ползучести в условиях работы под напряжением при повышенных температурах.

Свойства средне- и высоколегированных хромистых сталей во многом зависят от условий их термической обработки или температуры и длительности эксплуатации. В зависимости от химического состава и влияния термического воздействия в хромистых сталях наблюдаются: 475°-ная хрупкость; хрупкость, связанная с образованием σ-фазы; охрупчивание феррита, вызываемое нагревом до высоких температур; повышение температуры перехода к хрупкому состоянию.

475°-ная хрупкость появляется в хромистых сталях и сплавах, содержащих 15—70% Cr, после продолжительного действия температур 400—540° С (особенно около 475° С, рис. 5). Введение в состав стали титана или ниобия ускоряет процессы охрупчивания при 475° С.

При относительно небольших количествах хрома в стали σ-фаза либо не образуется, либо образуется весьма медленно. При содержании хрома более 20—25% ее выпадение значительно ускоряется. Наличие охрупчивания в результате теплового старения при 475° С или в результате выпадения σ фазы приводит к понижению коррозионной стойкости хромистых сталей. Кроме того, σ-фаза снижает сопротивление ползучести при высоких температурах. Устранение вредного влияния 475°-ной хрупкости и выпадения σ-фазы возможно нагревом выше температур их образования (соответственно выше 550 и примерно 900° С) с последующим ускоренным охлаждением до 400° С или более низкой температуры.

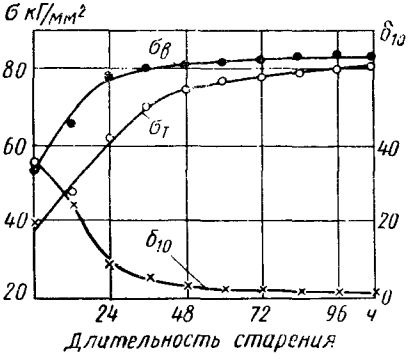


Рис. 5. Влияние продолжительности старения при 475° С на механические свойства хромистой стали (27% Cr) при комнатной температуре [20]

Высоколегированные хромистые стали, находящиеся в ферритном состоянии при температурах выше 1150° С, обладают склонностью к быстрому росту зерен. Одновременно эти стали всегда имеют карбидную фазу. В случае быстрого нагрева и охлаждения, как это имеет место при сварке, карбиды, растворяясь, обогащают только прилегающие к ним микрообъемы металла без общей гомогенизации, в результате чего в этих участках создаются условия для протекания при нагреве превращений $\alpha \rightarrow \gamma$ и при охлаждении $\gamma \rightarrow \alpha$. В случае быстрого охлаждения с высоких температур в воде или на воздухе такой металл становится малопластичным при обычных температурах. Отжиг или высокий отпуск при 730—790° С, приводящий к выделению карбидов в местах скопления углерода, в некоторой степени уменьшает хрупкость, вызванную воздействием нагрева до высоких температур и ускоренного охлаждения.

При испытании ударных образцов с надрезом переход от хрупких разрушений к вязким наблюдается при повышенных (по отношению к комнатной) температурах. Увеличенное содержание углерода и азота (примерно 0,08%) значительно смещает температуру перехода в хрупкое состояние в область более высоких температур (на 80—150° С). Отпущенные мартенситные стали с содержанием хрома около 12%, имеющие в структуре, кроме сорбита, и отдельные ферритные участки, также характеризуются повышенной температурой перехода в хрупкое состояние. У высокохромистых сталей с ферритной структурой улучшение этих характеристик может быть получено добавкой значительных количеств азота

1. Составы, основные свойства и назначения

Марка стали	Содержание [1] элементов				
	C	Si	Mn, не более	Cr	W
X5	≤ 0.15	≤ 0,50	0.50	4.5–6,0	–
X5M	≤ 0.15	≤ 0.50	0.50	4,5–6.0	–
X5ВФ	≤ 0.15	0.30–0.60	0.50	4,5–6,0	0.40–0.70
X6СМ	≤ 0.15	1,5–2.0	0.70	5,0–6,5	–
1Х8ВФ	0.08–0.15	≤ 0.60	0.50	7.0–8.5	0.6–1.0
1Х12Н2ВМФ	0.10–0,16	≤ 0.60	0.60	10.5–12,0	1,6–2.0
2Х13	0.16–0.24	≤ 0.60	0,60	12.0–14.0	–
1Х17Н2	0.11–0.17	≤ 0,80	0,80	16,0–18.0	–

[1] Серы в сталях всех марок не более 0,025, фосфора не более 0.03.

2. Составы, основные свойства и назначения хро

Марка стали	Содержание [1] элементов				
	C	Si	Mn	Cr	W
Х6СЮ	≤ 0.15	1.20–1,80	≤ 0.50	5,5–7.0	–
1Х11МФ	0.12–0.19	≤ 0,50	≤ 0.70	10.0–11,5	–
1Х12ВНМФ	0.12–0.18	≤ 0,40	0.50–0.90	11.0–13,0	0.70–1,1
2Х12ВМБФР *	0.15–0.22	≤ 0.50	≤ 0.50	11,0–13,0	0.40–0.70
1Х12В2МФ	0.10–0.17	≤ 0.50	0.50–0.80	11,0–13,0	1,7–2,2
1Х13	0.09–0.13	≤ 0.50	≤ 0.60	12,0–14,0	–
0Х12НД	≤ 0.10	≤ 0,40	0.30–0.60	12,0–13,5	–

[1] Серы в сталях всех марок не более 0.025, фосфора не более 0.03, в стали 0Х12НД не

хромистых сталей мартенситного класса

в %		
Прочие	Основные свойства	Примерное назначение
–	Жаростойкая, жаропрочная	Нефтеаппаратура, питательные насосы паросиловых установок
0,45–0,60 Mo	Жаропрочная до 550—600° С	Корпуса и внутренние элементы аппаратов нефтеперерабатывающих заводов и крекинговых труб, деталей насосов, задвижки
0,40–0,60 V	Жаропрочная до 550—600° С	
0,45—0,60 Mo	Окалиностойкая, жаропрочная до 700° С	Трубы, части насосов, задвижки, штоки
0,30—0,50 V	Жаропрочная до 500° С	Трубы печей, аппаратов и коммуникаций нефтезаводов
1,5—1,8 Ni 0,18–0,30 V 0,35—0,50 Mo	Жаропрочная до 600° С, окалиностойкая до 750° С	Диски компрессоров, лопатки и другие нагруженные детали
-	Коррозионностойкая, жаропрочная до 500° С	Лопатки паровых турбин, клапаны, болты, трубы
1,5—2,5 Ni	Коррозионностойкая, окалиностойкая	Оборудование азотнокислотных, консервных заводов, предметы домашнего обихода

мистых сталей мартенситно-ферритного класса

в %			Основные свойства	Примерное назначение
Mo	V	Прочие		
–	–	0,7—1,1 Al	Жаростойкая	Опоры высокотемпературных установок
0,60—0,80	0,25—0,40	–	Жаропрочная до 550° С	Рабочие и направляющие лопатки паровых турбин
0,50–0,70	0,15–0,30	0,04—0,8 Ni	Жаропрочная до 580° С	Роторы, диски, лопатки, болты
0,40—0,60	0,15—0,3	0,2—0,4 Nb	Жаропрочная до 600° С	То же
0,6 - 0,9	0,15—0,30	–	Жаропрочная до 600° С	Роторы, диски паровых турбин, рабочие и направляющие лопатки паровых и газовых турбин
–	–	–	Коррозионностойкая, жаропрочная до 500° С	Лопатки паровых турбин, клапаны, болты и трубы
–	–	1,0–1,5 Ni 0,8–1,3 Cu *	Нержавеющая кавитационностойкая	Лопатки гидротурбин

более 0,025. * Для литья 1,0—1,3%; для поковок 0,8—1,1% [20].

3. Составы, основные свойства и назначение

Марки стали	Содержание элементов				
	C	Si	Mn, не более	Cr	Прочие
1Х12С10	0,07—0,12	1,2—2,2	0,70	12,0—14,0	1,0—1,8 Al
0Х13 *	≤ 0,08	≤ 0,60	0,60	11,0—13,0	–
Х17	≤ 0,12	≤ 0,80	0,70	16,0—18,0	–
0Х17Т	≤ 0,08	≤ 0,80	0,70	16,0—18,0	5C—0,80 Ti
Х18С10	≤ 0,15	1,0—1,5	0,50	17,0—20,0	0,7—1,2 Al
Х25Т	≤ 0,15	≤ 1,0	0,80	24,0—27,0	5C—0,80 Ti
Х28	≤ 0,15	≤ 1,0	0,80	27,0—30,0	–

* В зависимости от соотношений C и Cr в пределах марочного состава сталь 0Х13 мо

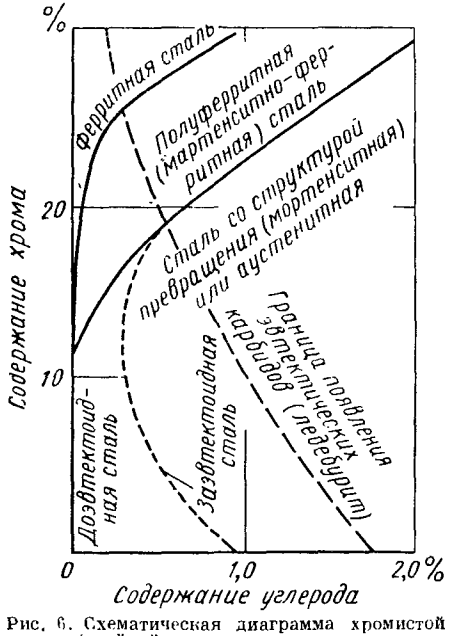


Рис. 6. Схематическая диаграмма хромистой стали (тройной системы железо — хром — углерод) [2]

(примерно $^1/_{100}$ от содержания хрома), что приводит к меньшему росту зерна при нагреве до высоких температур и улучшает их сварочные свойства.

В соответствии с влиянием хрома и углерода на кристаллическую решетку при температурах от обычных до плавления различают хромистые стали (рис. 6): мартенситные, ферритные, мартенситно-ферритные.

Средне- и высоколегированные хромистые стали с областью аустенита

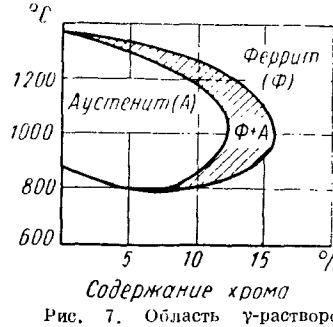


Рис. 7. Область γ-растворов в хромистых сталях, содержащих 0,05% C

хромистых сталей ферритного класса

в %		Основные свойства	Примерное назначение
S, не более	P		
0,025	0,030	Окалиностойкая до 900° С	Детали с пониженной нагрузкой
0,025	0,030	Коррозионностойкая	Химическая аппаратура, цилиндры газовых турбин
0,025	0,036	Кислотостойкая, жаростойкая	Оборудование азотнокислых и консервных заводов
0,025	0,035	Коррозионностойкая, жаростойкая	Оборудование азотнокислотных заводов, пищевой и мясопищевой промышленности, в средах средней агрессивности. Некоторые элементы котельных установок
0,025	0,035	Коррозионностойкая, жаростойкая	
0,025	0,035	Коррозионностойкая, жаростойкая до 1100° С	Элементы химической аппаратуры и котельных установок
0,025	0,035	Жаростойкая до 1100° С	Аппаратура для гипохлорита, натрия, азотной и фосфатной кислот

жет относиться и к ферритно-мартенситному классу.

при повышенных температурах при охлаждении даже с умеренными скоростями будут иметь при комнатной температуре мартенситную структуру, которая будет характерна для сталей с содержанием примерно до 12% Cr при 0,05%C (рис. 7).

При большем содержании хрома (примерно до 16%) в процессе нагрева сталь не будет целиком переходить в состояние аустенита, а будет сохранять и некоторое количество феррита. Последующее ее охлаждение приведет к получению смешанной мартенситно-ферритной структуры, с постепенно увеличивающимся относительным количеством феррита по мере увеличения содержания хрома в стали.

Дальнейшее увеличение содержания хрома (более 16%) приведет к тому, что при нагреве сталь при любых температурах сохраняет структуру феррита. Эта же структура получается и после охлаждения с любой скоростью. Различие может быть только в относительном количестве выпадающих карбидов.

Таким образом при содержании 0,05% C стали с содержанием до 12% Cr будут относиться к мартенситному классу, с 12—16% Cr — к мартенситно-ферритному, а при $>$ 16% Cr — к ферритному. При бо́льшом содержании углерода соответственно граничные значения по хрому будут смещаться в область его бо́льших концентраций.

Сварочные свойства хромистых сталей и свойства получаемых сварных соединений в значительной степени зависят от того, относится ли сталь к мартенситному или ферритному классам. Сварочные свойства мартенситно-ферритных сталей являются промежуточными, но практически приближаются к свойствам сталей мартенситной группы.

Составы средне- и высоколегированных хромистых сталей, выпускаемых в СССР, их основные свойства и примерное назначение регламентируются ГОСТом 5632—61, химический состав некоторых из этих сталей, которые применяются в сварных конструкциях и изделиях, приводится в табл. 1—3.

СВАРКА ВЫСОКОХРОМИСТЫХ МАРТЕНСИТНЫХ И МАРТЕНСИТНО-ФЕРРИТНЫХ СТАЛЕЙ

Стали мартенситного класса в условиях сварочного термического цикла закаливаются на мартенсит. Высокая твердость и низкая деформационная способность металла, имеющего мартенситную структуру, в результате деформаций, сопровождающих сварку, при достаточной жесткости свариваемого узла или конструкции приводит к возможности образования холодных трещин, особенно, на последней стадии непрерывного охлаждения при температурах ниже 120—100° С. Эта склонность к образованию трещин особенно сильно проявляется при повышенном содержании в металле водорода.

Для таких сталей наиболее распространена ручная дуговая сварка штучными электродами. Свойства сварных соединений оказываются достаточно близкими к свойствам свариваемого металла, если состав металла сварных швов подобен составу свариваемого металла и после сварки они подвергнуты дополнительной термической обработке.

В целях максимального приближения состава металла шва к основному металлу и получения достаточно мелкозернистой структуры литого металла сварных швов применяют электродные стержни, состав которых подобен составу свариваемого металла (обычно только с несколько меньшим содержанием углерода), и покрытия фтористо-кальциевого типа с достаточным количеством раскислителей (часто с алюминием и титаном) для модифицирования металла сварочной ванны при его кристаллизации [21].

Лучшие результаты с точки зрения меньшей вероятности образования в сварных соединениях холодных трещин получаются в случае высокотемпературной прокалки электродов (450° С — 2 *ч*) непосредственно перед сваркой (но не ранее чем за 2—3 *ч* до сварки). Однако при этом все же исключение трещин не гарантируется.

Образование трещин исключается применением предварительного и сопутствующего подогрева. Обычно при ручной дуговой сварке высокохромистых сталей мартенситного и мартенситно-ферритного класса температуру подогрева принимают 200—450° С; при этом чем более склонна сталь к закалке и чем жестче конструкция, тем температура подогрева должна быть выше.

В ряде случаев удается избежать общего подогрева, ограничившись местным подогревом, в частности, применяя гибкие индукторы, питаемые от мощных сварочных трансформаторов [13].

Во время сварки температура изделия (в районе выполняемого шва при местном подогреве) не должна опускаться ниже температуры мартенситного превращения свариваемой стали.

Как при общем, так и при местном подогреве, необходимо исключать возможность резких (даже временных) охлаждений места нагрева изделия ветром или сквозняками, так как при этом возрастает возможность образования трещин.

После сварки необходим высокий отпуск (общий или местный). Однако термическую обработку нельзя осуществлять непосредственно с температуры сопутствующего подогрева, так как структура в этом случае получается грубозернистой (см. рис. 8, *а*).

Для получения мелкозернистой структуры, обеспечивающей и достаточно высокую вязкость металла, необходимо, чтобы перед отпуском предварительно прошло мартенситное превращение, т. е. должно быть проведено охлаждение ниже температуры, при которой произойдет распад основной части аустенита металла шва и околошовной зоны. Однако, если охлаждение будет доведено до комнатных температур, то, хотя после отпуска структура (см. рис. 8, *б*) и свойства металла оказываются достаточно хорошими, в сварных конструкциях часто обнаруживаются трещины. Поэтому наиболее хорошие результаты получаются при более сложном термическом цикле: непосредственно после сварки изделие

охлаждают (подстуживают) до 150—120° С; выдерживают около 2 ч для распада аустенита, а затем подают на термическую обработку — отпуск. Структура металла в этом случае соответствует рис. 8, *б*.

Электроды для сварки средне- и высокохромистых сталей нужно выбирать в соответствии с условиями эксплуатации сварных конструкций и техническими требованиями к сварным соединениям. Во всех случаях, когда по условиям изготовления сварных конструкций возможен их подогрев и последующая термическая обработка, для сварки должны выбираться электроды, обеспечивающие получение состава металла швов близкого к составу свариваемой хромистой стали.

При выполнении швов, а также при некоторых ремонтных работах, когда невозможно после сварки осуществить термическую обработку, иногда применя-

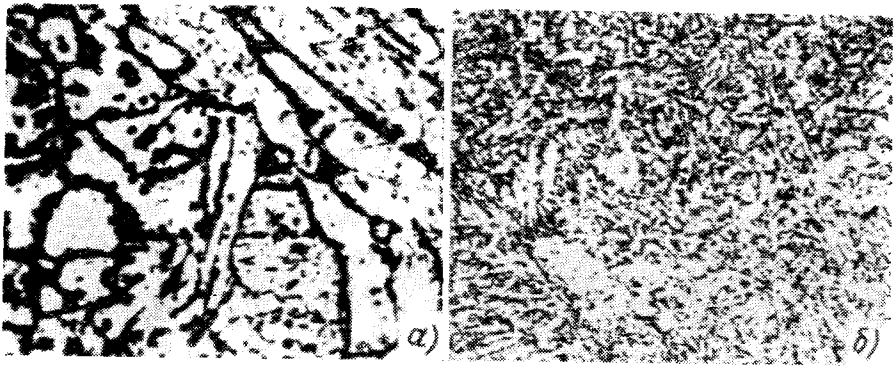


Рис. 8. Структура высокохромистой стали мартенситного класса в околошовной зоне после сварки с подогревом до 350° С и последующим высоким отпуском (× 300): *а* — без охлаждения после сварки; *б* — после охлаждения для распада аустенита

ют электроды, дающие аустенитный хромоникелевый металл сварного шва. Однако при этом следует учитывать, что в ряде случаев такие сварные соединения в условиях эксплуатации могут оказаться менее надежными (по прочности и коррозийной стойкости), чем соединения со швами по составу подобными свариваемому металлу.

Основные рекомендации по выбору сварочных материалов основных технологических приемах при сварке и последующей термической обработке, а также по свойствам сварных соединений сведены ниже применительно к различным типовым группам сталей рассматриваемого типа.

Стали с содержанием хрома 4—10%. Наибольшее распространение из этой группы имеют стали с содержанием хрома 4—6%, иногда с дополнительным легированием молибденом около 0,5%, ванадием примерно 0,3—0,6% и кремнием до 2%.

Электроды для сварки сталей этой группы, как правило, обеспечивают состав металла, аналогичный основному металлу. Наибольшее распространение имеют электроды марки ЦЛ-17[16]. Могут быть рекомендованы также электроды марки НЗЛ (СХ6М) [5]. Электродные стержни для этих электродов имеют состав (в %): 0,15 С; 5,5—6,5 Cr; 1,5—2 Si; 0,5—0,7 Mn; 0,4—0,6 Mo. Состав покрытия электродов НЗЛ (СХ6М) приведен в табл. 4.

Сварка электродами ЦЛ-17 и НЗЛ (СХ6М) выполняется с предварительным и сопутствующим подогревом до 300—350° С на постоянном токе при обратной полярности короткой дугой при любом положении шва в пространстве. Химический состав наплавленного этими электродами металла приведен в табл. 5.

4. Состав покрытия электродов НЗЛ (СХ6М)

Материал покрытия	Состав покрытия в %	Примечание
Мрамор	45	Толщина покрытия при диаметре 4 мм
Плавиковый шпат	25	
Ферросилиций	5	
Ферромарганец	5	
Ферротитан	20	около 1 мм на сторону
Жидкое стекло в % к шихте	30—35	

5. Химический состав наплавленного металла при сварке электродами НЗЛ (СХ6М) и ЦЛ-17

Марка электрода	Химический состав наплавленного металла в %							
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	S	P
НЗЛ/СХ6М	~ 0,2	~ 2,0	~ 1,5	5,0—6,0	0,3—0,5	—	≤ 0,04	≤ 0,04
ЦЛ-17	~ 0,13	0,2—0,3	0,5—0,7	4,5—5,5	0,4—0,6	0,1—0,2	≤ 0,04	≤ 0,04

После сварки проводится термическая обработка либо типа отжига (нагрев до 850—870° С, выдержка не менее 5 *мин* на 1 *мм* толщины, но не менее 1 *ч* при любой толщине металла; медленное охлаждение со скоростью не более 20° С/*ч* до 300° С и дальнейшее охлаждение на воздухе), либо высокого отпуска (нагрев до 750° С; выдержка; медленное охлаждение со скоростью не более 50° С/*ч* на каждые 10 *мм* толщины до примерно 600° С и дальнейшее охлаждение с печью).

Основные механические свойства наплавленного металла, полученного при сварке рассмотренными электродами, приведены в табл. 6.

6. Механические свойства наплавленного металла электродов марок НЗЛ (СХ6М) и ЦЛ-17

Марка электрода	Состояние наплавленного металла	Температура испытания в ° С	Механические свойства				
			$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ	ψ	$a_н$
			в кГ/мм²		в %		в кГм/см²
НЗЛ (СХ6М)	Исходное после сварки	20	65—70	—	—	—	—
	После отжига при 870° С	20	75—80	—	17—23	—	—
ЦЛ-17	Отпуск после сварки при 760° С, выдержка 3 *ч*	20	55	44	26	76	22
		450	46	38	16	64	25

Если подогрев и последующая термическая обработка невозможны, рекомендуется [17, 20] применять электроды, обеспечивающие получение аустенитного хромоникелевого наплавленного металла типов 25-20 или 25-13. При таком металле с достаточным запасом аустенитности и при ограниченной силе тока получающаяся доля расплавленного основного металла в слоях шва, прилегающих к границе оплавления, не приводит к образованию широкой зоны металла (отвечающему по составу сталям мартенситного класса), которая при последующем эксплуатационном нагреве (при температурах около 400° С) могла бы привести к получению сплошной хрупкой прослойки в шве вдоль границы сплавления.

Однако исследования, проведенные в ВНИИСТе [12], показали, что для сварки труб из стали типа Х5М возможно применение электродов, дающих наплавленный металл с 18% Cr и 8% Ni. Хотя при этом в результате перемешивания с основным металлом в корневом валике и валиках, прилегающих к границе сплавления, получаются зоны повышенной твердости, эксплуатационные характеристики сварного соединения оказываются для условий работы трубопроводов нефтеперерабатывающих заводов удовлетворительными.

Применение электродов типа 18-8 с покрытием ЭПТУ-3 показало хорошие технологические свойства и удовлетворительные свойства сварных соединений без последующей термической обработки. Так, при комнатной температуре предел прочности таких соединений составляет около 46 *кГ/мм*^{2}, при температуре испытания 500° С—35 *кГ/мм*^{2}; ударная вязкость при надрезе по зоне сплавления 10—19 *кГм/см*^{2}, по зоне термического воздействия 12—20 *кГм/см*^{2} и по металлу шва 10—12 *кГм/см*^{2}; углы загиба сварных соединений составляют 50—90°.

Последующая термическая обработка не увеличивает углов загиба таких сварных соединений. Однако при испытании на загиб при температуре 100—200°С и выше почти все сварные соединения, выполненные электродами типа 18-8 с покрытием ЭПТУ-3, обеспечивают углы загиба 180°.

Коррозионная стойкость таких сварных соединений в атмосфере паров бензина, керосина, лигроина и частично крекинг-газа при 365° С и продолжительности более 2000 *ч* оказалась выше стойкости соединений, сваренных электродами ЦЛ-17 и стойкости основного металла — стали Х5М.

Надежность сварных соединений таких сталей в трубопроводах, выполненных электродами типа 18-8, подтверждена достаточно продолжительной их эксплуатацией [11].

Стали с содержанием хрома 10—14%. Наивысшая коррозионная стойкость сталей получается в закаленном состоянии при полированной поверхности.

Стали этой группы весьма склонны к образованию холодных трещин при сварке. Сварка электродами, дающими наплавленный металл, подобный свариваемому, выполняется с предварительным и сопутствующим подогревом. При этом для сталей с меньшим содержанием углерода (например, 1Х13) температура подогрева может быть несколько ниже (300—350° С), чем при сварке сталей с более высоким содержанием углерода (например 2Х13, температура подогрева 400—450° С, особенно при большой толщине свариваемого узла или его значительной конструктивной жесткости).

Детали и узлы небольших габаритов рекомендуется подогревать и сваривать в специальных нагревателях, защищающих нагретую деталь от сквозняков.

В деталях небольшой жесткости и толщины в ряде случаев не образуются трещины при сварке без подогрева или с подогревом до 150° С, особенно при использовании электродов, прокаленных непосредственно перед сваркой.

Характеристика электродов марок УОНИ-13/Х13 и НЗЛ/Х13, применяемых для сварки сталей 1Х13, 2Х13, приведена в «Справочнике по сварке» [16]. Типичный химический состав наплавленного металла, получаемый при сварке такими электродами, приведен в табл. 7.

7. Типичный химический состав наплавленного металла при сварке электродами УОНИ-13/Х13 и НЗЛ/Х13

Марка электрода	Химический состав наплавленного металла в %					
	C	Si	Mn	Cr	S	P
УОНИ-13/Х13	0,10	0,35	0,40	11,0–13,0	≤ 0,035	≤ 0,035
НЗЛ/Х13	~ 0,15	~ 1,0	~ 1,2	11,0—13,0	≤ 0,035	≤ 0,035

После сварки обычно производят высокий отпуск при 700—730° С.

Сварка даже крупных деталей из стали 0Х12НДЛ электродами марки ЦЛ-41, дающими наплавленный металл, по составу аналогичный основному (с несколько меньшим содержанием меди), возможна при предварительном и сопутствующем подогреве примерно около 200° С [9, 17]. Механические свойства наплавленного металла электродами НЗЛ/Х13 и электродами ЦЛ-41 *, разработанными для сварки стали 0Х12НД, приведены в табл. 8.

8. Механические свойства наплавленного металла электродами НЗЛ/Х13 и ЦЛ-41 (температура испытания в ° С)

Марка электрода	Состояние наплавленного металла	Механические свойства	
		σ_R в $кГ/мм^2$	δ в %
НЗЛ/Х13	Исходное после сварки	76—80	2—3
	Отпуск после сварки при 700° С		10—17
ЦЛ-41	Отпуск после сварки при 670° С	67,0—68,3	15,7—18,0
	После нормализации 950° С и отпуска при 670° С	67,5—70,0	19,3—20,7

При дуговой сварке штучными электродами стали типа 1Х13 и 2Х13 изменяется ударная вязкость в околошовной зоне (табл. 9). Стали такого типа можно сваривать дуговой сваркой в атмосфере углекислого газа.

9. Ударная вязкость металла околошовной зоны и пластичность сварных соединений 13%-ной хромистой стали, выполненных электродами типа Х13 [14]

Состояние сварного соединения при испытаниях	Ударная вязкость в $кГм/см^2$ при расстоянии центра надреза образца от линии сплавления в *мм*					α °
	0	1	2	3	8	
Исходное после сварки при содержании в основном металле 0,1% С — 1Х13	3,3—3,8	2,7—3,6	2,1—2,5	2,1—2,3	7,4—7,8	180—180
То же при 0,2% С — 2Х13	0,6—0,8	0,6—0,7	0,4—0,6	0,6—0,7	6,9—7,9	120—160
Отпуск после сварки при 720° С при содержании в основном металле 0,1% С — 1Х13	5,7—6,5	4,9—5,1	3,9—4,7	3,8—4,5	7,6—7,9	180—180
То же при 0,15% С — 2Х13	5,9—6,3	4,5—4,8	3,2—4,0	3,3—4,2	6,8—7,3	180—180
То же при 0,2% С — 2Х13	5,5—6,1	4,1—5,0	3,1—3,6	2,9—3,7	6,5—7,5	180—180
То же при 0,25% С — 2Х13	4,7—5,1	3,2—3,7	2,9—3,5	2,7—3,5	6,3—7,1	180—180
После сварки нормализация с 1050° С и отпуск 720° С (при содержании в основном металле 0,2% С — 2Х13)	7,0—7,3	6,6—6,8	6,6—6,9	6,4—6,4	7,0—7,2	180—180

Согласно исследованиям Института электросварки им. Е. О. Патона [7,8] сварка закрепленных пластин стали 2Х13 толщиной 4 и 12 *мм* (при содержании углерода 0,18%, близком к нижнему пределу) тонкой электродной проволокой в углекислом газе без подогрева не приводит к образованию трещин, хотя твердость околошовной зоны возрастает до *HV* 340—360. При этом получается смешанная структура с наличием незакаленных участков — ферритных зерен.

* Паспорт на электроды ЦЛ-41 можно получить в ЦНИИТМАШе.

Меньшая склонность этих сталей к образованию трещин при сварке в углекислом газе может быть объяснена меньшей концентрацией водорода в металле швов, чем в случае сварки штучными электродами. При сварке в углекислом газе проволокой типа 2Х13 трещины не образовывались и в металле сварных швов. При сварке электродной проволокой марки Св-06Х14 в корневых швах небольшого сечения наблюдались отдельные трещины. Повышение стойкости против образования трещин и удовлетворительные механические свойства обеспечиваются, если в наплавленном металле содержится кремния 0,3—0,35%, хрома 13% и он дополнительно легируется 0,15—0,25% Ti.

Химический состав сварочной проволоки и металла швов при сварке стали 2Х13 толщиной 4 и 12 *мм* в углекислом газе приведен в табл 10. Механические

10. Химический состав сварочной проволоки и металла швов при сварке в углекислом газе стали марки 2Х13

Анализируемый металл	Химический состав в %					
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Ti
Сварочная проволока типа 2Х13	0.16	0.62	0.55	13.0	0.17	Следы
Металл шва	0.14–0.16	0.30–0.36	0.27–0.30	12.2–12.3	0.3	—
Сварочная проволока марки Св-06Х14	0.07	0.77	0.80	14.8	0.18	Следы
Металл шва	0.10–0.12	0.35–0.42	0.37–0.40	12.9–13.1	0.3	—
Порошковая проволока типа Св-08Х14ГТ	0.10	0.80	1.28	14.0	—	0.90
Металл шва	0.10–0.11	0.33–0.38	0.70–0.80	12.0–13.0	0.3	0.2

свойства сварных швов и соединений (после отпуска при 700°С) при различных температурах испытания даны в табл. 11.

11. Механические свойства металла швов при толщине свариваемого металла 12 *мм* и сварных соединений сталей 2Х13 толщиной 4 *мм* при сварке в углекислом газе

Марки электродной проволоки	Толщина свариваемого металла в *мм*	Температура испытания в °С	Механические свойства					α°
			$\sigma_в$ в *кГ/мм²*	$\sigma_т$ в *кГ/мм²*	δ в %	ψ в%	$a_н$ в *кГм/см²*	
Типа 2Х13	4	20	68.2–71.0	56.8–60.0	18.0–22,6	48.6–51.0	5,4–7.5	180–180
	4	500	40.3–51.7	36.1–42,5	13,3–14,6	51.0–51.0	7.2–8.7	—
	12	20	72.8–73,5	58.0–59,0	20.7–20,7	51,0–55,6	5.6–7.0	—
	12	500	55,5–55,5	47.0–47,7	11.5–11,8	48.6–53,3	7,5–8,4	—
Св-06Х14	4	20	68.6–74,6	58,8–60.0	18.7–23,3	50.0–53.6	6.7–7,2	114–180
	4	500	54.4–55,8	46.7–48,1	14,7–14.7	51.0–51,0	7,2–11,7	—
	12	20	65,0–65.7	48,8–49,8	20.3–22.3	55,6–55.6	6.0–6.5	—
	12	500	45,6–48.8	36,9–36,8	16,7–18.0	51,0–51,0	9,0–9,8	—
Порошковая типа Св-18Х14ГТ	4	20	76.0–78.1	64.3–65,0	18.0–20.0	48,8–51,2	5,3–6.3	150–180
	12	20	63,6–68.2	53,4–56.2	17,7–21,3	55,6–59,9	5.7–7.8	—
	12	500	47,0–51.0	36,4–43,0	11,2–16,5	14,5–55,6	14,5–18.7	—

Длительная прочность сварных соединений при 475 и 500° С примерно равна длительной прочности основного металла.

Жесткие узлы из стали марки 2Х13 с толщиной металла более 10 *мм* рекомендуется сваривать в атмосфере углекислого газа с предварительным и сопутствующим подогревом не ниже 150° С.

Аналогично можно сваривать сталь марки Х17Н2, применяемую как кислотостойкую, окалиностойкую и обладающую высоким сопротивлением ползучести до температуры 500° С. При сварке этой стали толщиной 8 *мм* на режиме: $I_{св}$ = 330 ÷ 350 *а*; $U_д$ = 28 ÷ 30 *в*; $v_{св}$ = 18 *м/ч* и расходе углекислого газа 15—17 *л/мин* без подогрева трещин в сварных соединениях не получалось. После сварки выполнялся отпуск при 700° С в течение 5 *ч*. Исследование кратковременных механических свойств, длительной прочности при 500° С и коррозионной стойкости в кипящей 56%-ной азотной кислоте и на межкристаллитную коррозию показали, что наилучшие результаты получаются при применении проволоки марки Св-08Х18Н2ГТ.

Сопоставление составов электродной проволоки и металла сварного шва приведено в табл. 12, а механические свойства металла шва после отпуска — в табл. 13 [5].

12. Химический состав электродной проволоки и металла шва при сварке стали Х17Н2 в углекислом газе

Анализируемый металл	Химический состав в %					
	C	Mn	S	Cr	Ni	Ti
Проволока Св-08Х18Н2ГТ (ГОСТ 2246—60)	0.09	1,1	0.41	17.8	2.0	0.98
Металл шва	0.11	0.9	0.20	16.6	2.0	0.24
Проволока Св-06Х14 (ГОСТ 2246—60) . . .	0.07	0.80	0.77	14.8	0.17	–
Металл шва	0,11	0.51	0,70	15,2	0.8	–

13. Механические свойства металла шва на стали марки Х17Н2, сваренной в углекислом газе после отпуска при 700° С — 5 *ч*

Марка электродной проволоки [1]	Температура испытаний в ° С	Механические свойства				
		$\sigma_в$ в *кГ/мм²*	$\sigma_т$ в *кГ/мм²*	δ_5 в %	ψ в %	$a_н$ в *кГм/см²*
Св-08Х18Н2ГТ (ГОСТ 2246—60 *)	20	80.1 –81.6	63,5 –64,1	10.0 –20.1	48.4 - 48.8	5,2 - 5,8
	500	58,3 - 62.1	47.2 50.9	14,1 – 14,7	48.6 – 53,3	12.2—13.1
Св-06Х14	20	73,0 76,5	60.2 –62.6	17.5 –17.7	41.0 –41.2	9.4— 9.7
	500	56.9—59,4	46,6—49,5	9,7 –11.2	30,6—36.5	10.6 – 12,5

[1] Применяется при работе изделий при температуре до 400° С в неагрессивных средах.

Значительную группу составляют высокохромистые жаропрочные стали (содержание 11—12% Cr). Для сварки этих сталей в СССР разработаны и применяются электроды ЦЛ-32, КТИ-9 и КТИ-10. Химический состав металла, наплавленного электродами этих марок, приведен в табл. 14 [16].

Электроды ЦЛ-32 предназначены для сварки стали 1Х11В2МФ; электроды КТИ-9 — стали 1Х11МФ, а электроды КТИ-10 — стали 1Х12ВНМФ при предельных температурах эксплуатации изделий соответственно 610; 560 и 580°С. Сварка производится постоянным током при обратной полярности.

14. Химический состав наплавленного металла электродов ЦЛ-32, КТИ-9 и КТИ-10

Марка электрода [1]	Химический состав наплавленного металла в %								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Другие элементы	S не более	P не более
ЦЛ-32	0.12–0.16	0.3–0.6	0.3	10.0—12.0	0.8—1.1	0.9—1.2	0.9—1.2 W	0.035	0.030
КТИ-9	0.09–0.13	0.5–1.0	0.3–0.7	9.5—11.5	0.6–0.9	0.6–0.9	0.2–0.4 V	0.030	0.035
КТИ-10	0.09–0.13	0.5–1.0	0.3—0.7	9,5—11,5	0.6–0.9	0.6–0.9	0.8—1.3 W 0.2—0.4 V	0.030	0.030

[1] Паспорта электродов ЦЛ-32 можно получить в ЦНИИТМАШе, а КТИ-9 и КТИ-10 — в ЦКТИ им. И. И. Ползунова.

При сварке толстостенных жестких конструкций рекомендуется предварительный и сопутствующий подогрев. При сварке электродами ЦЛ-32 температура подогрева должна быть 300—400° С, а для электродов КТИ-9 и КТИ-10 — не менее 300° С. После сварки необходим отпуск.

Свойства наплавленного металла в значительной степени зависят от температуры и длительности отпуска (рис. 9). Механические свойства наплавленного металла электродами этой группы приведены в табл. 15.

Сопоставление длительной прочности кованых сталей, наплавленного металла и сварных соединений при типичных температурах испытания приведено в табл. 16.

Согласно последним исследованиям ЦКТИ отпуск перед сваркой выполняется по обычно рекомендуемым для основного металла режимам.

Металл швов сталей этой группы в результате длительного старения при 600–610° С свои свойства изменяет сравнительно мало, хотя наблюдается некоторое снижение ударной вязкости. При температурах старения 450—550° С снижение прочности незначительно.

Металл швов рассматриваемой композиции является достаточно стойким в атмосфере воды и пара до температуры 600—610° С.

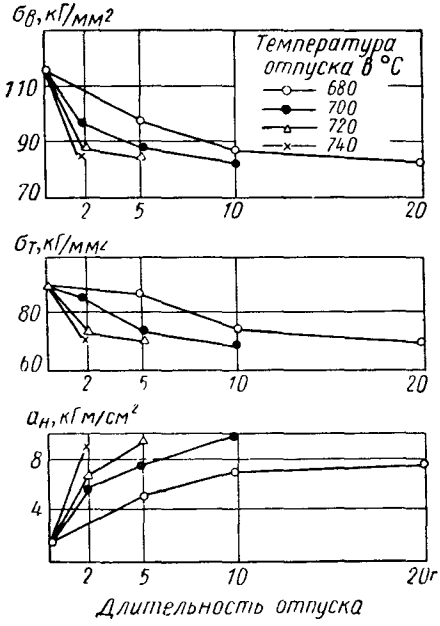


Рис. 9. Механические свойства наплавленного металла КТИ-10 в зависимости от режима отпуска после сварки [3, 15]

Институтом электросварки им. Е. О. Патона для сварки стали подобного типа (15Х11МФБ, состава в %: 0,14 — 0,22 С; 0,6—1,0 Mn; ≤0,5 Si; 9,5—11,5 Cr; 0.5—0,9 Ni; 0,8—1,05 Mo; 0,20—0,35 V; 0,10—0,25 Nb) в углекислом газе разработаны порошковые проволоки типов 15Х12НМВФБ и 15Х11НМВГ. Сварка выполняется с подогревом примерно до 350° С и последующим отпуском

15. Механические свойства наплавленного металла электродов ЦЛ-32, КТИ-9 и КТИ-10 при различных температурах

Марка электрода	Термическая обработка металла после сварки	Температура испытания в °С	Механические свойства				
			$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ_5	ψ	$a_н$
			в $кГ/мм^2$		в %		в $кГм/см^2$
ЦЛ-32	Отпуск при 730° С, выдержка 7 ч	20	75,0	60,0	12,0	40,0	4,0
		600	40,5	35,0	18,0	50,0	10,0
КТИ-9	Отпуск при 720° С, выдержка 5 ч	20	81,0	68,0	16,0	55,0	10,0
		550	40	36	15	60	15
КТИ-10		20	85,0	70,0	15,0	55	7,0
		580	45	42	20	70	15

16. Длительная прочность жаропрочных высокохромистых сталей наплавленного металла и сварных соединений [1, 15]

Марка свариваемой стали	Испытываемый образец	Термическая обработка		Температура испытания в °С	Предел длительной прочности за 100 000 ч в $кГ/мм^2$
		до сварки	после сварки		
1Х11В2МФ	Основной металл	—	—	610	≥ 9,0
	Наплавленный металл ЦЛ-32	—	730° С, 7 ч	610	10,0
1Х11МФ	Основной металл	675° С, 5 ч 740° С, 2 ч	— —	550 550	20,0 17,0—18,0
	Металл шва (КТИ-9)	— —	680° С, 5 ч 730° С, 5 ч	550 550	23,0 15,0
	Сварное соединение	680° С, 5 ч 720° С, 5 ч	700° С, 5 ч 700° С, 5 ч	550 550	17,0—18,0 14,0—15,0
1Х12В1МФ	Основной металл	680° С, 10 ч 720° С, 14 ч	— —	580 580	16,0 12,0
	Металл шва КТИ-10	—	700° С, 5 ч	580	16,0
	Сварное соединение	680° С, 5 ч 720° С, 5 ч	700° С, 5 ч 700° С, 5 ч	580 580	15,0—16,0 11,0—12,0

при 720 °С, в течение 10 ч. Металл шва, выполненный сварочными порошковыми проволоками этого состава, показал высокую стабильность свойств и структуры при тепловом старении при 600° С, а также достаточно высокую длительную прочность при 600° С. Длительная прочность сварных соединений стали 15Х11МФБ после сварки и термической обработки (720° С, 10 ч) составляет 9,0—9,5 $кГ/мм^2$, т. е. отвечает требованиям к основному металлу.

После устранения брака литья из стали марки 15Х11МФБ заваркой полная термическая обработка (двойная нормализация и отпуск при 740° С, 5ч) обеспе-

чивает при кратковременных испытаниях и по длительной прочности равнопрочность сварных соединений основному металлу.

Сварка этой стали возможна под флюсом АН-16 при использовании электродной проволоки марки Св-10Х11ВМФН по ГОСТу 2246—60. При этом обеспечиваются кратковременные механические свойства и длительная прочность сварных соединений при 600° С, соответствующие основному металлу.

Применительно к деталям паровых турбин довольно распространенными являются кольцевые швы (соединения элементов ротора, клапаны и т. д.) Сквозное проплавление швов с обеспечением плавных поверхностей с обратной стороны без применения подкладных колец может быть достигнуто аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом и сваркой в атмосфере углекислого газа при малом диаметре электродной проволоки. При изготовлении таких узлов на Ленинградском металлическом заводе корневой шов выполняется аргонодуговой сваркой, без предварительного и сопутствующего подогрева, при разделке под сварку в соответствии с рис. 10,*а*. Последующее заполнение (после контроля корневого валика на наличие сквозного провара и отсутствие трещин) осуществлялось дуговой сваркой штучными электродами при подогреве. При достаточном навыке сварщиков обеспечивалось хорошее формирование шва без недопустимых дефектов [13].

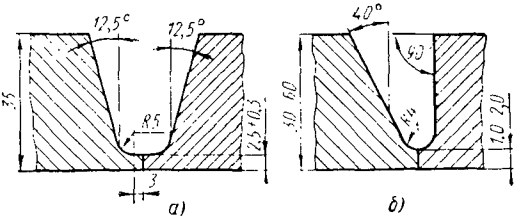


Рис. 10. Форма разделки под сварку кольцевых швов для получения сквозного проварка без применения подкладных колец: *а* — аргоно-дуговой сварки (ЛМЗ); *б* — сварки в углекислом газе (ПЭС)

Институтом электросварки им. Е. О. Патона разработаны режимы сварки таких швов в углекислом газе. Сварка выполняется при горизонтальном положении шва (подготовка кромок согласно рис. 10, *б*) полуавтоматом А-547 с использованием проволоки диаметром 1 *мм* при силе сварочного тока 180—200 *а* и напряжении дуги 20—22 *в*. Дальнейшее заполнение разделки осуществлялось полуавтоматом А-537 проволокой диаметром 1,6 *мм*.

Сварка выполняется от источника постоянного тока с жесткой внешней характеристикой. Для улучшения стабильности дуги в сварочную цепь рекомендуется последовательно включать индуктивное сопротивление.

СВАРКА ВЫСОКОХРОМИСТЫХ ФЕРРИТНЫХ СТАЛЕЙ

Как уже указывалось, основным недостатком сварных соединений этих сталей является крупнозернистость металла в околошовной зоне, а в ряде случаев и металла сварных швов, вызывающая значительную хрупкость. Эта хрупкость проявляется в снижении углов загиба (иногда до 10—20°) и ударной вязкости (до 0,6—0,8 *кГм/см*^{2}) сварных соединений при комнатной температуре [10]. Особенно значителен рост зерен при малососредоточенных сварочных источниках тепла (например, при газовой сварке) [21] и больших погонных энергиях.

При изготовлении конструкций из высокохромистых сталей наибольшее распространение имеет ручная дуговая сварка штучными электродами. В последнее время разрабатывается и сварка в атмосфере углекислого газа. При ручной сварке применяют электроды, которые дают состав наплавленного металла, близкий к свариваемому, либо хромоникелевый, обеспечивающий получение аустенитной или аустенитно-ферритной (ферритно-аустенитной) структуры в швах.

В первом случае хрупкость, связанная с укрупнением структуры, представляет опасность не только в околошовной зоне, но и в металле сварного шва [10].

В некоторой степени она может быть уменьшена, если применять электроды, дающие состав металла шва, который при сварочных скоростях охлаждения позволяет получить не чисто ферритную, а ферритно-мартенситную структуру. Этот путь оказывается возможным при содержании хрома до 18% посредством введения в наплавленный металл некоторого количества аустенизирующих элементов: C, N, Ni и Mn. В зависимости от свойств такого закаленного металла обосновывается и режим термической обработки после сварки.

В некоторых случаях невысокая пластичность сварных соединений в районе сварных швов оказывается допустимой по условиям эксплуатации и тогда основной задачей сварочной технологии является исключение возможности появления трещин в процессе изготовления сварной конструкции.

Обычно эти пути требуют применения невысокого предварительного и сопутствующего подогрева (примерно 120—180° С) и последующей термической обработки — отпуска при температуре около 800° С.

Для сталей с высоким содержанием хрома (обычно 25—30%) двухфазность структуры металла шва обеспечивается применением хромоникелевых электродов с содержанием 25—27% Cr и 4—5% Ni [4]. Основные сведения об электродах марок НЗЛ/Х17, НЗЛ/Х30 и ЦЛ-10, дающих высокохромистый наплавленный металл и используемых в СССР для сварки ферритных хромистых сталей, приведены в «Справочнике по сварке» [16].

Электроды марок ЦЛ-10 и НЗЛ/Х17 предназначены для сварки сталей, содержащих 17% Cr. Электроды ЦЛ-10 также используются при сварке двухслойных сталей (Мст.3 + 0Х12) для подварки плакирующего слоя, когда возможна последующая термическая обработка.

Электроды НЗЛ/Х30 используют при сварке сталей, содержащих 25—30% Cr. Типичный химический состав наплавленного этими электродами металла приведен в табл. 17, механические свойства указаны в табл. 18.

17. Типичный химический состав наплавленного металла

Марка электрода	Химический состав в %						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	S = P
ЦЛ-10	0,08	0,3—0,5	0,4—0,8	14,0—16,0	0,25	—	≤ 0,035
НЗЛ/Х17	0,12	0,4	0,5	15,0—17,0	-	—	≤ 0,035
НЗЛ/Х30	0,07	~ 0,5	~ 0,25	~ 30,0	~ 0,25	~ 0,25	≤ 0,035

18. Механические свойства наплавленного металла и сварных соединений, выполненных электродами ЦЛ-10 и НЗЛ/Х30

Марка электрода	Состояние испытываемого металла	$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ_5	ψ	$a_н$	Угол загиба в *град*
		в *кГ/мм²*		в %		в *кГм/см²*	
ЦЛ-10	Исходное после сварки	72	64	Хрупкий излом		6	—
	После отпуска при 650° С	65	46	18	48	8	—
НЗЛ/Х30	Исходное после сварки	55—58	—	-	—	-	10—15
	После нагрева при 800° С и охлаждения на воздухе	56—59	-	—	—	—	40—50

Сварка аустенитными электродами позволяет отказаться от последующей термической обработки, хотя укрупнение зерен в околошовной зоне свариваемых

ферритных сталей имеет место. Для сварки этой группы стали обычно применяются аустенитные электроды, дающие наплавленный металл типов 25-13 и 25-20. Такие электроды (например, марки ЦЛ-8) применяют, в частности, для подварки плакирующего слоя двухслойных сталей с хромистым плакирующим слоем, если после сварки термическая обработка выполнена быть не может.

По механическим свойствам указанные сварные соединения оказываются равнопрочными свариваемой ферритной хромистой стали. Однако в некоторых случаях применительно к коррозионно-агрессивной среде такие разнородные соединения могут работать значительно хуже, чем однородные, когда шов аналогичен основному металлу. Иногда они неудовлетворительно работают и при наличии теплосмен (чередующихся нагревов и охлаждений), в связи с значительной разницей теплового расширения ферритной хромистой и аустенитной хромоникелевой (шов) стали.

Институтом электросварки им. Е. О. Патона проведено исследование [6], показавшее возможность замены ручной сварки хромистой стали марки Х17 сваркой в углекислом газе. В этом случае можно применять проволоку марки Св-Х25Н20 и в некоторых случаях даже Св-0Х18Н9. Сварные соединения в этих случаях также равнопрочны свариваемой стали Х17.

В связи со значительными затруднениями в получении доброкачественных сварных соединений ферритных хромистых сталей в ряде случаев для сварных конструкций их заменяют хромоникелевыми ферритно-аустенитными, имеющими около 40—60% феррита в структуре.

ЛИТЕРАТУРА

1. Важенов В. В., Федяева Т. Р. Электроды для сварки теплоустойчивой хромистой стали. «Сварочное производство», 1958, № 3.
2. Гудремон Э. Специальные стали. Т. 1. Металлургиздат, 1959.
3. Земзин В. Н. Сварка высокохромистых жаропрочных сталей для деталей паровых турбин. Сб. ЛМЗ. № 9. «Свойства материалов, применяемых в гидростроении, и методы их испытаний». Л., Машгиз, 1962.
4. Земзин В. Н., Френкель Л. Д. Сварные конструкции паровых и газовых турбин. М. — Л., Машгиз, 1962.
5. Каховский Н. И. Сварка стали Х17Н2 в углекислом газе. «Автоматическая сварка», 1961, № 2.
6. Каховский Н. И. Механические свойства сварных соединений кислотостойкой стали Х17, выполняемых в углекислом газе аустенитной проволокой. «Автоматическая сварка», 1958, № 9.
7. Каховский Н. И. О структуре и свойствах околошовной зоны сварных соединений стали 2Х13. «Автоматическая сварка», 1958, № 2.
8. Каховский Н. И. Сварка высокохромистой стали 2Х13 в среде углекислого газа. «Автоматическая сварка», 1958.
9. Крянин И. Р., Бабушкина Г. И. Малоуглеродистая нержавеющая сталь 0Х12НД. Научно-техническая информация о работах ЦНИИТМАШа, ОНТИ, М., 1966.
10. Крутиков А. Н. Электродуговая сварка высокохромистой стали марки Х17 полуферритного класса. Труды НИИХИММАШа. Вып. 26. Информационно-издательский отдел. М., 1958.
11. Лившиц Л. С., Бахрах Л. П. Вопросы сварки сталей разнородных структурных классов. «Сварочное производство», 1962, № 11.
12. Мазель А. Г. Исследование сварки труб из стали Х5М. Сб. «Высокопроизводительные методы сварки в нефтяной промышленности». Гостоптехиздат, 1952.
13. Петров Г. Л., Земзин В. Н., Гонсеровский Ф. Г. Сварка жаропрочных нержавеющих сталей. М., Машгиз, 1963.
14. Работнов Б. А. Ударная вязкость металла зоны термического влияния сварных соединений высокохромистой стали. «Автоматическая сварка», 1958, № 9.
15. Смирнов И. Л., Земзин В. Н. Сварка хромистых жаропрочных сталей. Инф. техн. листок ЛДНТП, № 95—96, Л., 1958.
16. Справочник по сварке. Т. 2. Под ред. Е. В. Соколова. М., Машгиз, 1961.
17. Суслов В. Н. Разработка принципиальной технологии дуговой сварки рабочего колеса из нержавеющей стали 0Х12НД. Научно-техническая информация о работах ЦНИИТМАШа, ОНТИ, М., 1966.
18. Справочник сварщика. Т. 2. Перевод с английского. М., Трансжелдориздат, 1947.
19. Огиевицкий А. С. Дуговая электросварка конструкционных сталей. М., Машгиз, 1948.
20. Тилш. Хельмут. Физическая и сварочная металлургия хромистых нержавеющих сталей. Welding Journal.
21. Федотов Л. Е. Сварка хромистых жаропрочных сталей. Лениздат, 1945.

ГЛАВА VII

СВАРКА НИКЕЛЯ И НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА И ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ НИКЕЛЯ И ЕГО СПЛАВОВ

Заводы Советского Союза по ГОСТу 849—56* изготовляют никель пяти марок (табл. 1 и 2), который используется для переработки на полуфабрикаты (листы, ленты, полосы и т. д.) и изготовления сплавов на никелевой основе.

1. Химический состав металлургического никеля (по ГОСТу 849—56*)

Марка никеля	Ni	В том числе Co	Примеси	Марка никеля	Ni	В том числе Co	Примеси
Н-0	99,99	0,005	Остальное	Н-3	98,6	0,7	Остальное
Н-1	99,93	0,10					
Н-2	99,8	0,15		Н-4	97,6	0,7	

2. Основные механические свойства никеля при комнатной температуре

Состояние металла	$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ в %	*НВ*
	в кГ/мм²			
Чистый (в отожженном состоянии)	28—30	—	40—50	—
Кованый	54—61	28—33	31—37	127—158
Кованый и 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	—	—

Характерной особенностью чистого никеля является способность сохранять свои пластические свойства при низких температурах (табл. 3).

В техническом (полуфабрикатном) никеле содержатся небольшие добавки марганца, кремния, углерода, магния и других элементов, которые вводятся обычно как раскислители и десульфаторы. Никель обладает высокой коррозионной стойкостью и повышенными механическими свойствами. Монель (табл. 4) по своей структуре относится к сплавам типа твердых растворов. Медь и небольшие присадки железа и кремния находятся в растворе и самостоятельных фаз не образуют. Все сплавы типа монеля устойчивы против коррозии на воздухе, в мор

ской 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 и щелочей, пара и органических кислот. Ползучесть и жаропрочность медно-никелевых сплавов при температуре 250—500° С выше, чем медных.

3. Механические свойства никеля при низких температурах

Температура испытания в °С	Предел прочности в *кГ/мм²*	Относительное удлинение в %	Относительное сужение поперечного сечения в %
+17	45	35	77
—196	63	46	89
—253	79	48	69

Удельный вес никеля составляет 8,7—8,84 *г/см³*; температура плавления 1452—1455° С, а температура кипения при атмосферном давлении по различным данным 2730—3080° С; средняя удельная теплоемкость никеля в интервале температур 20—1630° С несколько меньше, чем у железа, теплопроводность при комнатной температуре равна 0,1428 *кал/см·сек·град*, с повышением температуры до 360° С (точки Кюри) она понижается, а при дальнейшем повышении температуры возрастает. Коэффициент линейного расширения тем больше, чем выше чистота металла и для металла чистотой 99,1% при комнатной температуре равен $13{,}3 \cdot 10^{-6}$ С [1].

4. Химический состав некоторых марок никелевых и медно-никелевых сплавов (ГОСТ 492—52*)

Наименование сплава	Марка сплава	Химический состав в %				
		Fe	Ni + Co	Cu	Si	Mn
Никель кремнистый	НК 0.2	—	Остальное	—	0.15—0.25	—
Никель марганцовистый	НМц 2,5	—	»	—	—	2,30—3,30
	НМц 5	—	»	—	—	4,60—5,40
Монель	НМЖМц 28—2,5—1,5	2,00 - 3,00	»	27,0—29,0	—	1.20—4,80

Химический состав никелевых сплавов очень разнообразен (табл. 5) и классифицировать их в ряде случае затруднительно. Условно их можно разделить на три группы: окалиностойкие, коррозионностойкие и жаропрочные. 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. Эти элементы вводят в сплавы одновременно в определенных сочетаниях, и чем выше требование жаропрочности, тем более сложен химический состав сплава.

Типовые механические и физические свойства никелевых сплавов приведены в табл. 6 и 7.

5. Химический состав (в %) и применение некоторых никелевых сплавов

Марка по ГОСТу (заводская маркировка)	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Другие элементы	Применение
				Окалиностойкие				
ХН78Т (ЭИ435)	≤ 0,12	≤ 0,8	≤ 0,7	19,0—22,0	Основа	—	0,15—0,35Ti ≤ 0,15Al ≤ 6,0Fe	Детали газопроводных систем, аппаратура, трубы
ХН70Ю (ЭИ652)	≤ 0,10	≤ 0,8	≤ 0,3	26,0—29,0	»	—	2,6—3,5Al ≤ 1,0Fe; ≤ 0,1Ba ≤ 0,03Ce	Листовые детали, газопроводы, работающие при умеренных напряжениях и температурах 850—1100° С
Х15Н60	≤ 0,15	0,4—1,3	≤ 1,5	15,0—18,0	55,0—61,0	—	≤ 0,2Al	Проволока и лента для реостатов печей
ХН70 (ЭИ442)	≤ 0,07	≤ 0,8	≤ 0,5	28,0—31,0	Основа	—	≤ 0,15Al ≤ 5,0Fe	Аппаратура и детали, работающие при температурах до 1150—1200°
ХН60Ю (ЭИ559А)	≤ 0,10	≤ 0,80	≤ 0,3	15,0—18,0	55,0—58,0	—	2,6—3,5Al ≤ 0,10Ba ≤ 0,03Ce	Листовые детали турбин, работающие при умеренных напряжениях и температурах 850—1100° С
ХН75МБТЮ (ЭИ602)	≤ 0,08	≤ 0,80	≤ 0,4	19,0—22,0	Основа	—	0,35—0,75Ti 0,35—0,75Al 1,8—2,3Mo 0,9—1,3Nb ≤ 8,0Fe	Листовые детали турбин, работающие при 800—950° С
ВЖ85	≤ 0,10	≤ 0,80	≤ 0,5	26,5—29,0	»	—	6,5—9,0W 0,3—0,7Ti ≤ 0,5Al ≤ 3,0Fe	Детали камер сгорания, форсажные камеры и другие детали, работающие при температурах до 1100° С
ХН60В (ЭИ868, ВЖ98)	≤ 0,10	≤ 0,80	≤ 0,5	23,5—26,5	»	—	13,0—16,0W 0,3—0,7Ti ≤ 0,5Al, ≤ 4,0Fe	Листовые материалы для камер сгорания до 1100° С
				Коррозионностойкие				
ЭИ460	≤ 0,10	1,0	1,0	—	Основа	18,0—21,0	—	Аппаратура для концентрированной серной и соляной кислот при температурах до 70° С
ЭИ461	≤ 0,10	1,0	≤ 1,0	1,0	»	27,0—30,0	—	То же
Н70М27 (ЭИ495)	≤ 0,10	0,25	0,5	—	»	25,0—29,0	1,5Fe 0,03Al	»
Н70М27Ф (ЭИ496)	≤ 0,12	1,0	1,0	—	»	28,0—32,0	5,5Fe	Устойчив в серной кислоте средней концентрации
0Х15Н55М16В (ЭИ567)	0,15	1,0	1,0	16,5	»	17,0	5,5Fe	Устойчив в окислительных средах и растворах, содержащих хлор

Жаропрочные

ХН77ТЮ (ЭИ437А)	≤ 0,6	≤ 0,6	≤ 0,4	19,0—22,0	Основа	—	2,3—2,7Ti 0,55—0,95Al ≤ 4,0Fe ≤ 0,01Ce	Лопатки турбин
ХН67ВМТЮР (ЭИ445Р)	≤ 0,08	≤ 0,6	≤ 0,5	17,0—20,0	»	4,0—5,0	2,2—2,8Ti 1,0—1,5Al ≤ 4,0—5,0W ≤ 4,0Fe ≤ 0,01Ce ≤ 0,01B	Лопатки турбин, работающие при 750—800° С
ХН70ВМТЮ (ЭИ617)	≤ 0,12	≤ 0,6	≤ 0,6	13,0—16,0	»	2,0—4,0	1,8—2,3Ti 1,7—2,3Al 5,0—7,0W 0,1—0,5V ≤ 5,0Fe 0,02Ce 0,02B	Лопатки турбин, работающие при 800—850° С
ХН70ВМЮТ (ЭИ765)	0,1—0,16	≤ 0,6	≤ 0,5	14,0—16,0	»	3,0—5,0	1,0—1,4Ti 1,7—2,2Al 4,0—6,0W ≤ 3,0Fe 0,01B	То же при 700—750° С
ХН80ТБЮ (ЭИ607, ЭИ766)	≤ 0,08	≤ 0,8	≤ 1,0	15,0—18,0	»	—	1,8—2,3Ti 0,5—1,0Al 1,0—1,5Nb ≤ 3,0Fe	То же
ЭИ698	≤ 0,08	≤ 0,7	≤ 0,4	13,0—16,0	»	1,7—2,5	2,0—2,6Ti 0,95—1,45Al 1,6—2,1Nb < 4,0Fe	Диски турбин
ЖС3 (ЭИ618)	0,11—0,16	≤ 0,6	≤ 0,6	14,0—18,0	»	3,0—4,5	1,6—2,3Ti 1,6—2,2Al 4,5—6,5W 0,3V ≤ 8,0Fe ≤ 0,02B	Лопатки соплового аппарата
ХН75МВЮ (ЭИ827)	≤ 0,08	≤ 0,4	≤ 0,4	9,0—11,0	»	5,0—6,5	4,5—5,5W 4,0—4,6Al ≤ 5,0Fe 0,02B 0,01Ce	Лопатки газовых турбин, работающие при 750—800° С
ХН77ТЮР (ЭИ437Б)	≤ 0,6	≤ 0,6	≤ 0,4	19,0—22,0	»	—	2,3—2,7Ti 0,55—0,95Al ≤ 4,0Fe ≤ 0,01Ce	Лопатки и диски газовых турбин
ХН676МТЮ (ЭИ445Р)	≤ 0,08	≤ 0,6	≤ 0,5	17,0—20,0	»	4,0—5,0	2,2—2,8Ti 1,0—1,5Al 4,0—5,0W ≤ 4,0Fe ≤ 0,01Ce	Диски, корпуса лопатки газовых турбин, работающие при 750—800° С

6. Типовые механические свойства некоторых никелевых сплавов

Марка стали по ГОСТу (заводская маркировка)	Термическая обработка	$\sigma_в$ в кГ/мм²	δ в %	ψ в %	$\sigma_т$ в кГ/мм²	$a_н$ в кГм/см²
ХН78Т (ЭИ435)	Закалка с 980—1020° С, охлаждение в воде или на воздухе	70	27,5	30	—	—
ХН70Ю (ЭИ652)	То же с 1100° С, охлаждение на воздухе	75	—	30	—	—
ХН60Ю (ЭИ559А)	В состоянии поставки	65	—	30	—	—
ХН70 (ЭИ442)	То же	70	20	—	—	—
ХН75МБТЮ (ЭИ602)	Закалка с 1050 - 1080° С, охлаждение на воздухе	75	40	40	—	—
Х15Н60	—	60	25	45	—	—
ХН77ТЮ (ЭИ437А)	Закалка с 1080° С, охлаждение на воздухе. Старение при 700° С, 16 ч	100	25	28	60	8
ХН77ТЮР (ЭИ437Б)	То же	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, охлаждение в воде. Ступенчатое старение	95	18	22	65	7
ХН67ВМТЮ (ЭИ445)	Закалка с 1200° С, охлаждение на воздухе. Старение при 850° С, 15 ч	100—110	20—30	20—30	55—75	6—12
ХН70ВМЮТ (ЭИ765)	Закалка с 1150°, охлаждение в масле. Старение при 800° С, 2 ч	105	20	25	60	8
ХН67ВМТЮР (ЭИ445Р)	Аустенизация при 1200° С, охлаждение на воздухе. Старение при 850° С, 15 ч	100—110	20—30	20—30	55—75	6—12
(ЭИ460)	Отжиг	77—84	40	40	33—36	—
(ЭИ461)	»	91—98	40—45	40—45	42—46	—

7. Типовые физические свойства некоторых никелевых сплавов

Марка стали по ГОСТу (заводская маркировка)	γ в кг/см³	λ в кал/см·сек·°С	$\alpha \cdot 10^6$ в °С$^{-1}$	$\rho \cdot 10^6$ в ом/мм²·м	$E \cdot 10^{-3}$ в кГ/мм²
ХН78Т (ЭИ435)	8,35	0,035	12,8	—	19,5
ХН70 (ЭИ442)	8,3	—	—	1,14	—
ХН75МБТЮ (ЭИ602)	8,3	0,032	12,4	—	19,0
Х15Н60	8,1	—	—	1,10	—
ХН78Т (ЭИ435)	8,35	—	—	1,11	—
ХН77ТЮ (ЭИ437А)	8,2	0,033	12,7	1,27	19,0
ХН77ТЮР (ЭИ437Б)	8,2	0,033	12,7	—	19,8
ХН70ВМТЮ (ЭИ617)	8,4	0,023	12,0	—	20,0
ХН67ВМТЮР (ЭИ445Р)	8,42	0,033	10,4	—	—
ХН80ТБЮ (ЭИ607)	8,3	0,032	13,1	1,17	22,0
ХН70ВМЮТ (ЭИ765)	8,6	0,022	12,1	1,33	22,6
(ЭИ460)	8,8	0,011	—	—	18,9
(ЭИ461)	9,24	0,010	10,0	—	21,5

Наличие в никелехромистых сплавах типа ХН60В (ЭИ868) вольфрама и молибдена снижает их окалиностойкость. На основе сплавов типа 60-25 разработаны два сплава с 8 и 14% W, соответственно марки ВЖ85 и ВЖ98. Они относятся к гомогенным, обладают хорошими технологическими свойствами и достаточно высокой окалиностойкостью, хорошо штампуются и свариваются; применяются для изделий, работающих при высоких температурах и небольших нагрузках, но несколько более высоких, чем сплавы марок ЭИ435 и ЭИ602.

Жаропрочные сплавы (табл. 5) 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.

Для сварки никеля и никелевых сплавов применяют следующие способы сварки; газовую, ручную дуговую, под флюсом, вольфрамовым электродом в среде инертных газов. В последнее время находит применение электронно-лучевая сварка. Выбор способа и технологии 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.

При дуговой сварке никеля и его сплавов нет необходимости всегда стремиться к получению металла шва, обладающего таким же химическим составом и структурой, как свариваемый материал. Например, технически чистый никель не удается сварить без пор, трещин, с достаточно высокими показателями механических и коррозионных свойств шва, если его химический состав и структура будут идентичными основному металлу. Для получения сварных швов, удовлетворяющих разнообразным требованиям, часто приходится прибегать к комплексному легированию 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 надежно легирование электродной проволокой определенного состава в сочетании с пассивным нелегирующим электродным покрытием, флюсом или защитой инертным газом. При этом должны быть обеспечены условия, обеспечивающие полное усвоение сварочной ванной легирующих элементов, содержащихся в основном и присадочном металлах. Во время ручной сварки легирование шва может осуществляться через электродное покрытие, в состав которого вводятся соответствующие порошки металлов или ферросплавов. При сварке под обычными плавленными флюсами легирование металла шва является следствием физико-химических процессов между окислами флюса и никелем.

Большое влияние на свойства металла сварных швов оказывает содержание в нем серы. Она обладает большим химическим сродством к никелю. Особенно это заметно при температурах выше 400° С, когда в течение короткого времени возникает сульфид никеля, образующий с никелем при 645° С легкоплавкую эвтектику, которая содержит 21,5% серы. Она располагается вдоль границ зерен металла и охрупчивает его. Практически пластичность никеля исчезает полностью. Особенно чувствителен к сере чистый никель. Глубина и скорость проникновения серы в никель зависит от температуры. Температура до 400° С рассматривается как граница, в пределах которой заметного проникновения серы в никель не наблюдается. Сульфид никеля может образоваться, если с никелем соприкасаются материалы, которые содержат даже небольшие количества серы (горючие материалы, масло, жиры, краски и т. п.).

При сварке никеля и его сплавов необходимо, чтобы свариваемый металл был чистым. При долгом хранении никеля и медно-никелевых сплавов в заводской атмосфере на них образуется налет, содержащий серу. Этот налет не снимается при обезжиривании и требует механической зачистки перед сваркой, на

расстоянии 20—30 *мм* от разделки и последующего обезжиривания ацетоном, уайт-спиритом или чистым бензином.

Особенно тщательно нужно предупреждать контакт расплавленного металла с атмосферным воздухом. Никель и никелевые сплавы в расплавленном состоянии могут растворять большое количество газов (азота, водорода и кислорода), которые, выделяясь при кристаллизации и охлаждении металла шва, могут приводить к образованию в них пор. По одним литературным данным основной причиной пористости швов при аргоно-дуговой сварке вольфрамовым электродом сплава НП-2 является азот и окись углерода. Меньшее влияние оказывал кислород. В других литературных источниках указывается и на связь пор с водородом. При этом отмечается, что легирование шва титаном, хромом и ванадием уменьшает вероятность образования пор, а цирконием, марганцем, углеродом, ниобием, кремнием и железом — увеличивает. Поэтому необходимо при сварке тщательно защищать расплавленный металл и зону сварки от попадания воздуха, влаги и других загрязнений. Для этого следует применять прокалку электрода, поддув газа, подкладки и подушки для защиты обратной стороны шва, тщательно очищать поверхности кромок и присадочной проволоки.

При сварке никеля и сплавов его с медью зона термического влияния не закаливается и не имеет таких дефектов, для предотвращения которых необходимы предварительный подогрев или последующая термическая обработка.

В сплавах никеля с молибденом и никеля с молибденом и хромом типа «Хастеллой» по зоне сплавления может возникнуть коррозия, для предотвращения которой сварное соединение подвергают последующей термообработке, заключающейся в нагреве до температуры отжига и резкой закалке. Сваривать эти сплавы газовой сваркой не рекомендуется ввиду того, что при этом способе сварки металл продолжительное время подвергается действию высокой температуры, что может привести к понижению коррозионной стойкости. Следует также опасаться науглероживания металла шва (при газовой сварке или сварке угольной дугой), снижающего стойкость шва против коррозии.

При сварке никеля и его сплавов металл в сварочной ванне менее жидкотекуч, чем при сварке стали, и проплавляется на меньшую глубину. Поэтому увеличивают ширину разделки кромок и их притупление. При сварке кислотостойкой аппаратуры следует избегать бортовых соединений и соединения встык с отбортовкой кромок, так как образующиеся в этом случае с обратной стороны шва «карманы» могут повести к возникновению 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 вызвать рост зерна, склонность к трещинообразованию сварного шва и околошовной зоны, снижение коррозионной стойкости и т. д. При сварке коррозионностойких сплавов (ЭП196, ЭП567 и др.) увеличе-

8. ГОСТы или технические условия на электродную проволоку из никеля и никелевых сплавов

Марки или заводские маркировки электродной проволоки	ГОСТ или технические условия
Н-1	ГОСТ 2179—59
ХН78Т (ЭИ435)	ЧМТУ 5216—55
ЭИ639	ТУ-МУ-МОС 7212-64
Н70М27	ЧМТУ/ЦНИИЧМ 1156—64
0Х15Н55М16В (ЭП567)	ЧМТУ/ЦНИИЧМ 1156—64
ХН80ТБЮ (ЭИ607)	ЧМТУ/ЦНИИЧМ 37—58
ХН77ТЮР (ЭИ437Б)	ЧМТУ 5850-57
ХН75МВЮ (ЭИ827)	ЧМТУ 5564—56
ХН67ВМТЮ (ЭП202)	ЧМТУ/ЦНИИЧМ 631—62

ние количества проходов снижает коррозионную стойкость сварных соединений и может привести к образованию трещин в местах пересечения швов.

ГОСТы или технические условия, по которым выпускаются электродные проволоки, используемые при сварке никеля и никелевых сплавов некоторых марок, указаны в табл. 8.

ГАЗОВАЯ СВАРКА

Этот способ применяют при сварке никеля, медноникелевых сплавов и (ограниченно) других сплавов никеля. При кислородно-ацетиленовой сварке никеля и медноникелевых сплавов необходимо поддерживать нормальное пламя, так как избыток кислорода вызывает окисление расплавленного металла и хрупкость; допускается применять пламя с небольшим избытком ацетилена. Однако значительный избыток ацетилена 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 изделия. Главным дефектом при газовой сварке являются поры, из которых при нагрузке возникают трещины. Качество сварки зависит от состава флюсов (табл. 9) и раскислителей,

9. Состав флюсов для газовой сварки никеля и никелевых сплавов

Наименование компонентов	Содержание во флюсе в %					
	1	2	3	4	5	6
Бура прокаленная	52	30	25	—	50	40
Кислота борная	15	50	75	—	50	50
Магний хлористый	8	—	—	—	—	—
Натрий хлористый	15	10	—	—	—	—
Кальций фтористый	—	—	—	15	—	10
Гашеная известь	—	—	—	17	—	—
Борный ангидрит	—	—	—	23	—	—
Натриевое стекло	—	—	—	45	—	—
Барий углекислый	—	10	—	—	—	—

конструкции соединения, положения швов, а также от опытности сварщика. Большое влияние также оказывает состав присадочной проволоки. Для сварки никеля рекомендуется применять присадочную проволоку такого же состава, что и основной металл. Хорошие результаты дает 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 в наплавленном металле не должно превышать 2% Mn, 0,8% Si, 0,3% Mg и 0,1% Ti. Проволока должна иметь чистую поверхность. Диаметр ее рекомендуется выбирать равным половине толщины свариваемого металла.

Во время сварки следует 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.

Присадочная проволока должна оплавляться равномерно. 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 сварочная ванна более интенсивно взаимодействует с кислородом окружающего воздуха. Его можно применять при сварке изделий из

металла толщиной 1—2 *мм*. При правом методе пламя направлено на расплавленный металл, в результате чего замедляется охлаждение сварочной ванны, уменьшается окисление расплавленного металла и предотвращается пористость и образование трещин. Пламя горелки направляется к поверхности свариваемого изделия 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.

Значительное влияние на качество сварного соединения никеля оказывает чистота ацетилена, который может являться источником загрязнения шва серой. Поэтому при сварке необходимо применять хорошо очищенный, а лучше всего растворенный ацетилен. Сварку никеля следует выполнять без задержек и возврата на сваренный участок во избежание перегрева околошовной зоны, сопровождающегося образованием трещин. Следует также избегать многослойной газовой сварки.

Для уменьшения коробления при сварке тонких (до 1 *мм*) листов следует отгибать кромки, повышая тем самым жесткость листов. Сварка производится без присадочной проволоки. Листы толщиной до 4 *мм* сваривают встык без скоса кромок, а толстые — 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 сборка под сварку делается с большим зазором.

Дефектные места швов (места с порами и трещинами) следует вырубать и заваривать вновь. В тех случаях, когда конструкция должна иметь гладкую поверхность, после газовой или дуговой сварки швов проковывают или прокатывают. При этом прочность его повышается за счет измельчения структуры. Иногда после проковки следует отжиг. После такой обработки прочность швов равна прочности основного металла. При сварке никеля и его сплавов необходимо обращать внимание на то, чтобы в изделии возникали минимальные сварочные напряжения для предотвращения коррозии под напряжением. Это требование трудно выполнимо при газовой сварке, когда возникает также опасность науглероживания металла шва.

Флюсы применяют главным образом для облегчения растворения окислов, защиты сварочной ванны от действия окружающего воздуха и улучшения жидкотекучести металла. Их обычно приготавливают в виде пасты и 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.

Сварные соединения из никеля, выполненные газовой сваркой, обычно имеют предел прочности 26—32 *кГ/мм*^{2} и угол загиба 90—120° для толщины до 10 *мм*, что значительно ниже соответствующих показателей для основного металла.

Сварка нихрома затруднена вследствие образования на поверхности ванны тугоплавкой пленки окиси хрома, которую удаляют обычно механическим путем. Процесс ведут 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 свариваемый металл. При сварке используют флюс-пасту № 6 (табл. 9). После отжига предел прочности сварного соединения из нихрома, выполненного ацетилено-кислородной сваркой, равен 35—45 *кГ/мм*^{2}. Некоторые данные о механических свойствах швов при газовой сварке приведены в табл. 12.

РУЧНАЯ ДУГОВАЯ СВАРКА

Этот вид сварки применяется в основном для соединения листов толщиной свыше 1,5 *мм* и ведется электродами с качественным (чаще основным) покрытием на постоянном токе обратной полярности. Для предупреждения перегрева

электрода и получения возможно меньших напряжений в сварном соединении используют пониженный сварочный ток (табл. 10) что также уменьшает угар

10. Ориентировочные режимы ручной сварки никелевых сплавов качественными электродами

Толщина металла в мм	Диаметр электрода в мм	Длина электрода в мм	Сварочный ток в *а*	Толщина металла в мм	Диаметр электрода в мм	Длина электрода в мм	Сварочный ток в *а*
До 2	2	150–200	30–50	3–5	3–4	250–300	80–140
2–2,5	2–3	200–225	40–80	5–8	4	300	90–100
2,5–3,0	3	225–250	70–100	8–12	4–5	300–400	100–165

стабилизирующих и раскислительных элементов, содержащихся в электродной проволоке. При этом необходимо поддерживать короткую дугу и вести сварку при небольшой скорости. Поперечные движения электрода не должны превышать трех его диаметров. Скорость сварки никелевых сплавов примерно на 15% меньше скорости сварки сталей. Большой ток и высокие скорости сварки ведут к перегреву электрода и к дефектам шва. Сварку следует по возможности вести в нижнем положении.

При сварке никеля металлический стержень электродов по составу часто идентичен основному металлу. Применяя соответствующие электроды и режимы сварки, часто можно получить швы с коррозионной стойкостью и другими свойствами не ниже, чем у 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 дает механическое полирование.

11. Состав покрытия некоторых электродов для сварки никеля и никелевых сплавов

Компоненты	Состав покрытия электродов в %					
	Н-10	Н-37	«Прогресс-50»	ИМЕТ-7	ВИ-2-6	ИМЕТ-10
Мрамор	40,0	40,0	–	6,0	43,0	10,0
Плавиковый шпат	48,5	18,0	20,0	–	45,0	22,0
Кварцевый песок	3,0	–	–	–	–	–
Сода кальцинированная	2,0	–	–	–	–	–
Ферромарганец Мн-0	3,5	–	–	–	14,0	3,0
Ферросилиций Си-75	3,0	4,0 (Си-45)	–	–	–	–
Ферротитан Ти-1	–	11,0	–	–	–	–
Марганец металлический Мр-1	–	10,0	8,0	–	–	–
Порошок алюминиевый ПАП-1	–	7,0	6,0 (ПА-3)	–	–	–
Лигатура	–	10,0	–	–	–	–
Двуокись титана	–	–	52,0	25,0	–	20,0
Хлористый натрий	–	–	6,0	–	–	–
Титановый порошок ИМП-1А	–	–	8,0	–	–	–
Бентонит	–	–	1,0	–	–	–
Фтористый кальций (чистый)	–	–	–	59,0	–	–
Хромоникелевая лигатура	–	–	–	6,0	–	–
Окись алюминия	–	–	–	15,0	–	5,0
Молибден	–	–	–	30,0	4,0	–
Хром металлический	–	–	–	–	–	40,0
Ферровольфрам	–	–	–	–	–	20,0
Алюминат натрия (в % к весу сухих компонентов)	–	–	–	10–12	–	–
Жидкое стекло (в % к весу сухих компонентов)	30,0	28–30	–	–	–	–

12. Механические свойства металла шва и сварных соединений

Марка сплава	Толщина в мм	Марка сварочной проволоки или электрода	Способ сварки	Испытуемый образец	Механические свойства			
					$\sigma_в$	$\sigma_Г$	$a_н$	δ в %
					в $Г/мм^2$		$кГм/см^2$	
ЭИ437Б	12	ЭИ437А	Под флюсом АНФ-5	Металл шва	79,7	66,5	–	5.9
Нимоник 80А	0.9 1,6	Нимоник 80А	Аргоно-дуговая	Сварное соединение	82,2 85,5		– –	27.0 9,0
ЭИ496	3,0 5,0 10,0	–			78.8 79,8 101.0	–	9.3 7,2 6,2	– – –
ЭИ567	3,0 5,0 10.0				78.3 77.5 84,0		– 20,1 9,6	– – –
ЭИ435	125	ЭИ435	Электрошлаковая, пластинчатым электродом флюс АНФ-1	Металл шва	63,8	28,8	40.5	17,4
ЭИ437Б	100	ЭИ437Б	То же. Флюс АНФ-7	То же	76,2	58,7	–	18,0
				Сварное соединение	80.0	–	–	17.4
Н-1	–	Н-1	Газовая с Х-образной разделкой	Сварное соединение	54.6	42.7	–	17,1
			То же с V-образной разделкой		53,1	44.2	–	15.0
ЭИ496 ЭИ567	3,0 3,0	– –	Газовая		68.9 57.0	– –	– –	– –
Типа Х20Н80	– – –	ЦЧМ-2 ИМЕТ-4 ИМЕТ-4П	Ручная дуговая	Сварное соединение	39,2 62,5 74,2	– – –	17,4 15,0 2,0	40.5 22,5 6,9
ЭИ496	3,0 10.0	– –			82.6 88.5	– –	7,6 5,2	– –
ЭИ567	3,0 10.0	– –			75,1 –	– –	– 7,4	– –

При сварке никеля 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 шлака. Длинные швы лучше сваривать участками, оставляя небольшие разрывы, завариваемые после очистки от шлака. Шов выполняют с усилением, которое после сошлифовывают. Проковка шва улучшает его качество, однако, если металл содержит сульфиды, она не должна быть слишком сильной во избежание трещин.

Для сварки никеля можно использовать электроды марки Н-10, Н-37 и «Прогресс-50» (табл. 11). В качестве электродного прутка применяют никелевую проволоку Н-1 по ГОСТу 2179—59.

При сварке электродами Н-10 швы получаются пористыми. Поэтому их используют лишь при выполнении неответственных работ. Пористость швов может быть несколько снижена путем предварительного подогрева свариваемого изделия до 250—300° С.

Основным недостатком электродов Н-37 является то, что при их использовании во многих случаях швы получаются неплотными, пористыми, особенно при сварке никеля марок НП-1 и НП-2.

Электроды «Прогресс-50», применяемые для сварки никеля, отличаются от известных тем, что имеют покрытие кислого типа (табл. 10), позволяющие получать высококачественные сварные соединения при сварке не только никеля марки Н-1, но и никеля марок НП-1 и НП-2.

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.

Для сварки никелехромистых сплавов марок ХН78Т (ЭИ435) и ХН77ТЮР (ЭИ437Б) используют электроды марки ЦТ-28 и ЦЧМ-3, а сплавов ХН80ТБЮ (ЭИ607), ХН80ТБЮА (ЭИ607А), ХН70ВМТЮ (ЭИ617) и ХН75МВТЮ (ЭИ827) — и электроды ИМЕТ-4, ИМЕТ-7, ИМЕТ-4П, ВИ-2-6 (табл. 11). При сварке сплава ЭИ496 хорошие результаты дают электроды марки ВЦ-21, а стали ЭП567 — марки С-5. После сварки для снятия остаточных сварочных напряжений рекомендуется соответствующая термообработка. Некоторые данные о выборе электродов и механических свойствах швов приведены в табл. 12 и 13.

13. Механические свойства сварных соединений

Способ сварки	$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ
	в *кГ/мм²*		в %
Никельмолибденовые сплавы			
Ручная дуговая	55—78	33—41	7—45
Ручная аргоно-дуговая	70—78	30—42	16—45
Никельхроммолибденовые сплавы			
Ручная дуговая	62—80	37—43	9,4—30,5
Ручная аргоно-дуговая	62—78	35—41	10—30

СВАРКА ПОД ФЛЮСОМ И ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ СВАРКА

Требования к подготовке поверхности листов и электродной проволоки под сварку такие же, как и при ручной дуговой сварке. При сварке никеля марок Н-1, Н-2, НП-1 и НП-2 используют керамический флюс ЖН-1, при сварке

никелевых сплавов — бескислородные фторидные флюсы АНФ-5, АНФ-8, 48-ОФ-6 и высокоосновной флюс АН-29. В качестве электродной проволоки применяют никелевую проволоку марок Н-1, НП-1, НП-2. В случае использования проволоки НМц-2,5 из состава флюса исключают металлический марганец. При сварке никелевых сплавов электродную проволоку выбирают близкой по составу к основному металлу.

Сварка никеля и никелевых сплавов под флюсом производится постоянным током 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 нежелательности перегрева основного металла сварку стремятся выполнять швами небольшого сечения. Это предопределяет применение электродных проволок небольшого диаметра (2—3 *мм*). Ввиду высокого электросопротивления высоконикелевых электродных проволок и повышенного коэффициента расплавления следует уменьшать вылет электрода в 1,5—2 раза по сравнению с вылетом обычной стальной проволоки.

Некоторые рекомендации по выбору флюса, электродной проволоки при сварке под флюсом и электрошлаковой сварке, а также данные о механических свойствах швов приведены в табл. 12—15.

14. Длительная прочность сварных соединений некоторых никелевых сплавов

Марка сплава	Способ сварки	Толщина металла в *мм*	Марка сварочной проволоки	Условия испытания		Время до разрушения в ч			δ в %
				Температура в °С	Постоянное напряжение в *кГ/мм²*	Металл шва	Сварное соединение	Основной металл	
ЭИ437Б	Под флюсом АНФ-5	12	ЭИ437А	550	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
ЭИ437Б*	Электрошлаковая, флюс АНФ-7	100	Пластинчатый ЭИ437Б	700	44 40	40—67 50	24—42 116	— —	— —
Нимоник 80А**	Аргоно-дуговая вольфрамовым электродом	1,5	—	750	21	—	125—161	84—183	0,8—1,3

* Режим термообработки сварного соединения: 1080° С, 8 ч, воздух+700° С, 16 ч, воздух.

** Режим термообработки сварного соединения: 1050° С, 15 *мин*, воздух+700° С, 16 ч, воздух.

15. Механические свойства металла шва и сварного соединения на сплаве ЭИ437Б при электрошлаковой сварке (флюс АПФ-7)

Образцы и состояние	Температура испытания в °С	$\sigma_в$ в кГ/мм²	$\sigma_т$ в кГ/мм²	δ в %	$a_н$ в кГм/см²
Металл шва	20 700	68 50	37 25	41 46	22 —
То же, после закалки и старения	20 700	76 67	58 51	18 18	6,6 —
Сварное соединение То же, после закалки и старения	20 20	67 80	— —	44 17	— —

АРГОНО-ДУГОВАЯ СВАРКА

При аргоно-дуговой сварке расплавленный металл в сварочной ванне надежно предохраняется от окисления защитной струей аргона, в результате чего обеспечивается постоянное и высокое качество сварных соединений. Однако при большой толщине листов не всегда удается обеспечить достаточную защиту расплавленного металла от окружающего воздуха. Применение удлиненных наконечников горелок специальной формы, защиты аргоном обратной стороны шва и другие мероприятия вызывают дополнительные конструктивные и технологические трудности.

Одним из средств предотвращения пористости при аргоно-дуговой сварке никеля, как указывается в литературе, является добавка к аргону до 20% водорода. Никель растворяет большое количество водорода как в жидком, так и в твердом состоянии. При кристаллизации никель может растворить водорода вдвое больше, чем аустенитная сталь, и в три 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 должно строго контролироваться, так как при чрезмерной его концентрации (более 20%) поры могут появиться уже вследствие избытка водорода.

Аргоно-дуговая сварка может осуществляться неплавящимся вольфрамовым электродом с присадочным прутком или по отбортовке кромок, а также плавящейся никелевой проволокой. С целью повышения качества сварных соединений желательно применять при сварке никелевую проволоку, легированную до 3% титаном.

При использовании вольфрамного электрода аргоно-дуговая сварка никеля и его сплавов производится на постоянном токе прямой полярности (минус на электроде) при питании сварочной дуги от обычных серийных преобразователей (типа ПС-300) или сварочных выпрямителей. Принципиально возможна сварка и на переменном токе. Чтобы избежать включений вольфрама в металле шва при зажигании дуги, возбуждение ее 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 аргоно-дуговой сварке часто пользуются также заходными или выходными пластинами. Аргоно-дуговую

сварку нельзя производить на сквозняках, так как защитная струя газа может сдуваться потоком воздуха. При сварке толстых листов следует использовать плавящийся электрод.

В качестве неплавящегося электрода рекомендуется применять вольфрамовые прутки марок ВЛ-10 по ВТУ ВЛ № 24-5-62. Сварку вольфрамовым электродом следует производить «левым» способом на плотно поджатой медной подкладке или с защитой корня шва аргоном. Швы желательно накладывать с минимальными по-

16. Ориентировочные режимы ручной аргоно-дуговой сварки стыковых соединений никеля и сплавов ЭП496 и ЭП567

Разделка кромок	Толщина металла в *мм*	Количество проходов	Диаметр в *мм*		Сварочный ток в *а*	Расход аргона в горелку в *л/мин*
			вольфрамового электрода	присадочной проволоки		
Без разделки	2 4	1 2	1,5—2,0 2,0—2,5	1,0—1,5 1,5—2,0	70—90 80—100	8—10 8—10
V-образная	4 6 10	2 3 4	2,0—2,5 2,0—2,5 2,5—3,0	2,0—2,5 2,5—3,0 3,0	80—100 80—100 100—120	8—10 10—12 10—12
X-образная	6 8 10	2 4 4	2,0—2,5 2,5—3,0 2,5—3,0	2,5—3,0 2,5—3,0 2,5—3,0	90—120 90—120 100—120	10—12 10—12 10—12

Примечание. Расход аргона на защиту корня шва 2—3 *л/мин*.

17. Ориентировочные режимы автоматической аргоно-дуговой сварки вольфрамовым электродом сплавов ЭП496 и ЭП567 (без разделки кромок)

Толщина металла в *мм*	Сварка без присадки			Сварка с присадочной проволокой		
	Количество проходов	Сварочный ток в *а*	Напряжение дуги в *в*	Количество проходов	Сварочный ток в *а*	Напряжение дуги в *в*
1,5	—	—	—	1	85—90	10—12
2,0	1—2	100—120	10—12	1—2	120—150	10—12
3,0	2	170—200	13—15	2	190—200	12—14
4,0	2	230—250	14—17	—	—	—

18. Механические свойства сварных соединений никеля марки НП-2 при аргоно-дуговой сварке вольфрамовым электродом

Температура испытания в °С	Марка присадочной проволоки			
	НМцАТ-3-1-0,6		Н-1	
	$\sigma_в$ в *кГ/мм²*	$a_н$ в *кГм/см²*	$\sigma_в$ в *кГ/мм²*	$a_н$ в *кГм/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

перечными колебаниями электрода и максимально возможной скоростью. Допускается и сварка широкими швами. Наклон горелки к оси шва должен составлять 45—60°, а вылет вольфрамового электрода — 12—15 *мм*. Присадочный металл нужно подавать под углом 20—30° к оси шва. Длина дуги должна быть минимальной. 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, выполняют в последнюю очередь.

Ориентировочные режимы сварки никеля и никелевых сплавов приведены в табл. 16 и 17.

19. Механические свойства сварных соединений сплавов ЭП496 и ЭП567, выполненных ручной аргоно-дуговой сваркой вольфрамовым электродом

Температура испытания в °С	Сплав ЭП496				Сплав ЭП567	
	Без термообработки		Термообработка 1050° С, 30 *мин*, охлаждение в воду			
	$\sigma_в$ в *кГ/мм²*	$a_н$ в *кГм/см²*	$\sigma_в$ в *кГ/мм²*	$a_н$ в *кГм/см²*	$\sigma_в$ в *кГ/мм²*	$a_н$ в *кГм/см²*
−60	80,2	6,2	79,3	15,7	76,8	19,3
+20	79,8	7,3	78,2	14,7	77,5	20,1
+400	73,1	8,6	72,5	17,4	66,9	20,8
+600	65,4	7,0	64,0	14,7	64,3	19,8

20. Жаропрочность сварных соединений некоторых никелевых сплавов

Марка сплава	Способ сварки	Испытуемый металл	Условия испытания		Время до разрушения в ч	δ в %	ψ в %	Место разрушения
			Температура в °С	Напряжение в *кГ/мм²*				
ЭИ437Б	–	Основной металл	700	44	115	–	–	–
	Электронно-лучевая	Сварное соединение			89	3,07	6,4	По шву
	Аргоно-дуговая	То же			30	1,3	11,5	»
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	800 *		115	14,1	26,2	По шву
ЭИ445Р	–	Основной металл	800	25	130	7,6	16,0	
	Электронно-лучевая	Сварное соединение			110	7,0	15,3	

* Аустенизация 1200° С, 1 ч, воздух.

При сварке применяют аргон марки Л (ГОСТ 10157–62). Защиту газом рекомендуется производить и со стороны подкладки.

В качестве присадочного материала для сварки никельмолибденовых сплавов Н70М27 (ЭП495) и Н70М27Ф (ЭП496) следует применять электродную проволоку марки ЭИ639, поставляемую по ТУ-МУ-МОС 7212—64, или Н70М270 по ЧМТУ (ЦНИИЧМ 1156—64), а для сварки никельхромомолибденового сплава 0Х15Н55М16В (ЭП567) — электродную проволоку марки 0Х15Н55М16В (ЭП567) по ЧМТУ (ЦНИИЧМ 1156—64). Сварные соединения из этих сплавов подлежат термической обработке по режиму: нагрев до 1050° С, выдержка 3 *мин* на 1 *мм* толщины, но не менее 20 *мин*, охлаждение в воде. Для сварки никельхромового сплава марки ХН67ВМТЮ (ЭП202) в качестве присадочной проволоки рекомендуется использовать электродную проволоку марки ЭП356.

При сварке конструкций из сплава типа «инконель» первый проход (корневой шов) рекомендуется выполнять без присадочной проволоки (переплавленный в корневом шве основной металл обладает достаточной сопротивляемостью образованию горячих трещин), а каждый последующий проход — после охлаждения предыдущего до температуры ниже 90° С.

Некоторые данные о свойствах сварных швов при аргоно-дуговой сварке приведены в табл. 18—20.

КОНТАКТНАЯ СВАРКА

Никель и высоконикелевые сплавы (монель, инконель и др.) точечной сваркой хорошо свариваются между собой, а также со сталями и многими медными сплавами. Ввиду того что никелевые сплавы обладают сравнительно низкой электропроводностью (значительно меньшей, чем малоуглеродистые стали), их точечная сварка осуществляется при умеренной силе тока. Никель и его сплавы являются весьма прочными, что обусловливает применение высоких давлений на электроды. Сварка

21. Ориентировочные режимы точечной сварки никеля и его сплавов

Материал	Толщина листа в *мм*	Давление на электроды		Сварочный ток в *а*	Время сварки в *сек*
		общее в *кГ*	удельное в *кГ/см²*		
Технический никель	0,5–1,8	112	1440	7 760	0,51–0,67
	0,9–1,5	195	2450	9 200	0,51–0,67
	1,6–2,2	780	2450	21 600	0,83–1,0
	2,3–2,5	1050	2100	26 400	1,67–2,0
	2,5–3,2	1500	2100	30 800	2,67–3,34
Монель-металл	0,5–0,8	184	1050	6 200	1,67–2,0
	0,9–1,5	313	1750	10 600	1,67–2,0
	1,6–2,2	890	280	15 300	1,67–2,0
	2,3–2,5	1220	2450	20 000	2,67–3,34
	2,5–3,2	1750	2450	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	1,67–2,0
	1,6–2,2	890	2800	6 100	1,67–2,0
	2,3–2,5	1400	2800	12 700	2,67–3,34
	2,5–3,2	2400	2450	20 100	4,18–5,0
Инконель	0,5	85	1050	4 040	0,20
	0,8	300	1750	6 710	0,20
	1,5	1100	3500	9 300	0,20
	2,5	1400	2800	12 700	0,33

теплоустойчивых сплавов выполняется с усиленным охлаждением свариваемого металла. С этой целью электроды и изделие погружают в воду или омывают струей воды.

В связи с применением высоких удельных давлений на электроды их необходимо изготовлять из сплавов высокой твердости. При сварке никеля и его сплавов могут применяться сферические или конические электроды с плоским торцом. Диаметр электродов для листов толщиной 0,5—1,5;1,5—2,5;2,5—3,0 *мм* выбирают соответственно 3—6, 6—8 и 8—10 *мм*. Перед сваркой поверхности деталей тщательно зачищаются механическим путем или травлением.

С целью получения качественных сварных соединений необходимо выбирать минимальные токи, чтобы избежать излишнего перегрева металла и связанных с ним дефектов. Ориентировочные режимы точечной сварки технического никеля и некоторых его сплавов приведены в табл. 21.

Соединения деталей из никеля и его сплавов можно также успешно выполнять роликовой и стыковой контактной сваркой.

Некоторые данные о механических свойствах сварных соединений приведены в табл. 22.

22. Прочность (в *кГ/мм*²) сварных соединений на стали ЭИ868 после старения [1] при различных способах сварки

Температура испытания в °С	Старение после сварки			Старение до сварки	
	аргоно-дуговой	шовной	точечной	аргоно-дуговой	шовной
20	105	90	895	90	—
800	52—55	31—36	325—480	31—34	19—24
900	32—36	28—30	325—480	31—34	19—24

[1] Режим старения: 800° С, 2 ч, охлаждение на воздухе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Медовар Б. И. Сварка жаропрочных аустенитных сталей и сплавов. М., «Машиностроение», 1966.
2. Михайлов-Михеев П. В. Справочник по металлическим материалам турбино- и моторостроения. М., Машгиз, 1961.
3. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы. М., «Металлургия», 1964.

ГЛАВА VIII

СВАРКА РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

СВАРКА РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ

Особенности сварки

В сварных конструкциях могут использоваться соединения сталей одного структурного класса разного легирования или разного структурного класса [6, 7] (перлитные стали с аустенитными хромоникелевыми или с мартенситно-ферритными и ферритными высокохромистыми).

При изготовлении конструкций из разнородных сталей может использоваться большинство существующих методов сварки.

Наибольшее распространение получила ручная дуговая сварка. Перспективным является внедрение автоматической сварки под флюсом [17] и прежде всего ее способов, обеспечивающих минимальное проплавление основного металла. В отдельных узлах может использоваться электрошлаковая сварка [16]. Применительно к выполнению сварных соединений разнородных перлитных сталей и перлитных с высокохромистыми широкие возможности имеет сварка в среде углекислого газа [5], а для сварных соединений разнородных аустенитных сталей — сварка в среде аргона. Для стыковки труб малого диаметра в котлостроении широко используется контактная стыковая сварка [2]. Для изготовления переходных элементов из аустенитной стали с перлитной рекомендуются различные методы сварки давлением в вакууме [14]. Все большее распространение при изготовлении конструкций из разнородных сталей находит сварка трением, электронно-лучевая и диффузионная сварка.

Режимы сварки плавлением разнородных сталей обычно принимаются близкими к режимам для сварки стали одного легирования при использовании тех же сварочных материалов.

При сварке разнородных сталей, кроме общих положений свариваемости, должны учитываться следующие дополнительные факторы, определяющие выбор основного и присадочного материалов и работоспособность изделия:

изменение состава шва в участках, примыкающих к основному металлу другого легирования, чем наплавленный металл;

развитие в зоне сплавления [1] разнородных материалов малопрочных и хрупких кристаллизационных и диффузионных прослоек переменного состава;

наличие остаточных сварочных напряжений в соединениях разного структурного класса, которые не могут быть сняты термической обработкой.

Указанные факторы обусловливают развитую химическую, структурную и механическую неоднородность сварных соединений.

Неоднородность металла сварного шва. Химический состав различных слоев шва можно подсчитать, зная для каждого слоя доли участия наплавленного

[1] Под зоной сплавления условно понимается область, включающая в себя границу сплавления, а также непосредственно примыкающие к ней со стороны шва и околошовной зоны участки переменного состава за счет развития в них кристаллизационных и диффузионных процессов.

и проплавленного металла. При наплавке (рис. 1, *а*) содержание элемента в первом и n-м слоях соответственно определяется по формулам [9]

$$C_ш^1 = (1 - \theta)C_{нм} + \theta C_{пр} \quad (1)$$

и

$$C_ш^n = C_{нм} - (C_{нм} - C_{пр})\,\theta^n, \quad (2)$$

где $C_{нм}$ — содержание элемента в наплавленном металле с учетом его перехода из электродного стержня, покрытия или флюса, а также угара элемента при сварке; расчет $C_{нм}$ дан в работе [13, 15];

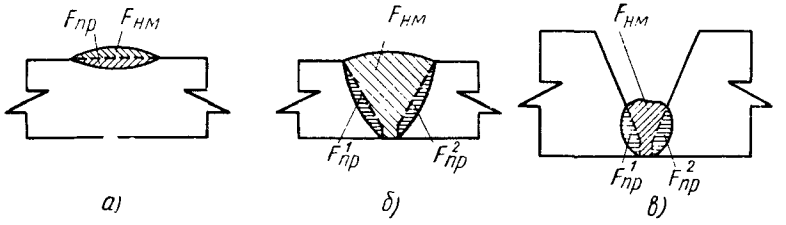


Рис. 1. Схемы определения состава шва: *а* — наплавка валика; *б* — однослойный стыковой шов; *в* — корневой слой стыкового соединения

$C_{пр}$ — содержание элемента в проплавленном основном металле.

$\dfrac{F_{пр}}{F_{нм} + F_{пр}} = \theta$ — доля основного металла в шве.

Содержание элемента в однослойном стыковом шве (рис. 1, *б*) или корневом слое многослойного шва (рис. 1, *в*)

$$C_ш^1 = (1 - \theta)\,C_{нм} + t\theta C_{пр}^1 + (1 - t)\,\theta C_{пр}^2; \quad (3)$$

$C_{пр}^1$ — содержание элемента в стали 1;

$C_{пр}^2$ — содержание элемента в стали 2;

$$\theta = \frac{F_{пр}^1 + F_{пр}^2}{F_{нм} + F_{пр}^1 + F_{пр}^2};$$

$t = \dfrac{F_{пр}^1}{F_{пр}^2}$ — степень проплавления одной из кромок относительно другой в однослойном шве. При сварке перлитной стали с аустенитной значение t для последней может быть принято равным 0,6.

1. Доля участия основного металла θ при наплавке и сварке перлитной и аустенитной стали

Тип соединения	Структурный класс стали	Доля участия θ для сварки (в %)			
		ручной дуговой	под флюсом	наплавки ленточным электродом	электрошлаковой
Наплавка валика	Перлитная Аустенитная	15—40 25—50	25—50 35—60	8—20 15—25	— —
Однослойные стыковые соединения	Перлитная Аустенитная	20—40 30—50	25—50 40—60	— —	20—40 30—50
Корневые швы многослойных стыковых и угловых швов	Перлитная Аустенитная	25—50 35—60	35—60 40—70	— —	— —

В табл. 1 приведены обобщенные данные о доли участия перлитной и аустенитной стали в шве для основных методов сварки плавлением и типов соединений.

При использовании методов сварки давлением с нагревом и оплавлением (например, точечной или шовной) состав литого ядра определяется соотношением проплавленных участков свариваемых деталей. Аустенитную сталь с перлитной в этих случаях целесообразно сваривать на жестких режимах, обеспечивающих минимальное проплавление перлитной составляющей.

Предварительная оценка структуры возможных переходных составов шва в зависимости от степени перемешивания, сочетания свариваемых сталей и легирования наплавленного металла может быть выполнена с помощью структурной диаграммы для наплавленного металла [6]. Пример ее использования для определения возможных структур металла первого слоя наплавки и однослойного шва показан на рис. 2. При наплавке аустенитно-ферритными электродами состава *Б* на перлитную сталь *А* структурный состав первого слоя будет определяться отрезком *аб*, а при наплавке электродами со стержнем состава *А* — на аустенитную сталь состава *Б* — отрезком *а'б'*. В последнем случае наплавка будет по своей структуре мартенситной и склонной к холодным трещинам. Структурный состав металла однослойного шва при сварке перлитной стали *А* с аустенитной *В* аустенитными электродами состава *Г* будет определяться отрезком *вг*.

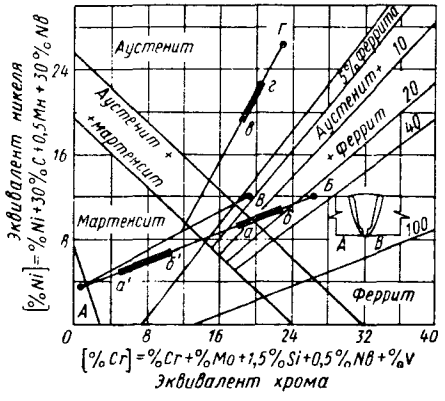


Рис. 2. Определение с помощью структурной диаграммы фазового состава швов при наплавке и сварке стыкового шва

С помощью структурной диаграммы при знании свойств переходных составов шва [6, 11] можно определить предельные значения доли участия в шве основного металла, выше которых свойства металла шва становятся недопустимыми. Эти величины для случая сварки аустенитными электродами перлитных сталей приведены в табл. 2.

2. Предельная доля участия в шве основного металла (перлитной стали) в зависимости от типа аустенитного шва

Тип металла шва (ГОСТ 10052—62*)	ЭА1, ЭА-1Б	ЭА-1М2Ф	ЭА-1Г6	ЭА-2
Композиция наплавленного металла	Х18Н9	Х19Н12М2Ф	Х20Н10Г6	Х25Н13
Предельная доля участия в %	10	30	30	35
Тип металла шва (ГОСТ 10052—62*)	ЭА-3М6	ЭА-4В3Б2	На никелевой основе	ЭА-3Г6
Композиция наплавленного металла	Х15Н25М6	2Х15Н35В3Б2	Х15Н70М10	Х23Н17Г6
Предельная доля участия в %	45	45	45	40

Зона сплавления сварных соединений. При выборе сварочных материалов и оценке работоспособности комбинированных сварных конструкций из разнородных сталей особое внимание должно уделяться зоне сплавления основного металла и шва разного легирования. Последняя может быть вероятным участком развития хрупких разрушений во время изготовления и эксплуатации конструкций. Среди процессов, определяющих строение и свойства этой зоны, наибольшее значение имеют условия кристаллизации разнородных материалов и развитие в ней диффузионных прослоек переменного состава.

В результате незавершенности процессов смешивания наплавленного металла с основным при сварке вблизи границы сплавления со стороны шва возникают

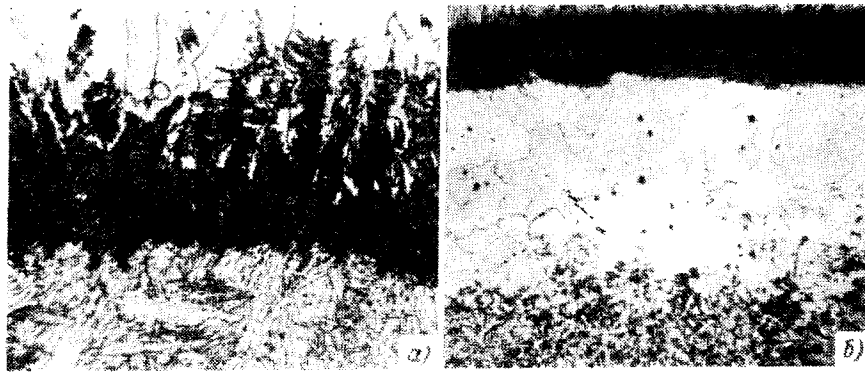


Рис. 3. Микроструктуры прослоек в зоне сплавления перлитной стали с аустенитным швом: *а* — кристаллизационная прослойка — шов Х18Н9; (×300); *б* — диффузионная прослойка, сталь 30, шов Х25Н13, отпуск 700° С — 2 ч (×300)

прослойки переменного состава между основным металлом и швом, условно называемые кристаллизационными. Протяженность этих прослоек по имеющимся данным обычно колеблется для разных условий сварки в пределах 0,2—0,6 *мм*. В сварных соединениях сталей одного структурного класса и соединениях перлитных сталей с хромистыми (12% хрома) свойства кристаллизационных прослоек являются в большинстве случаев промежуточными между свойствами основного металла и шва и поэтому наличие указанных прослоек не оказывает вредного влияния на работоспособность конструкции. В отличие от этого в зоне сплавления сварных соединений перлитных сталей с аустенитными швами кристаллизационные прослойки, содержащие около 3—12% хрома и 2—8% никеля, обладают высокой твердостью и имеют мартенситную структуру (рис. 3,*а*).

Протяженность мартенситных прослоек тем больше, чем меньше запас аустенитности шва. Наибольшего развития они достигают при сварке электродами композиции Х18Н9. Применение наплавленного металла на никелевой основе практически исключает образование прослоек с мартенситной структурой.

Значительное влияние на строение зоны сплавления и свойства сварного соединения оказывает развитие в ней переходных прослоек, обусловленных миграцией углерода из нелегированной составляющей в составляющую, обогащенную энергичными карбидообразующими элементами [1, 8 ,12]. Указанные диффузионные прослойки возникают в сварных соединениях разнородных перлитных сталей и в соединениях перлитных сталей с мартенситными, ферритными и аустенитными сталями или швами (рис. 3, *б*). В зоне сплавления со стороны менее

легированных стали или шва образуется обезуглероженная полоса, а со стороны легированной составляющей — науглероженная прослойка высокой твердости. Их протяженность растет с повышением разницы в легировании контактируемых материалов и достигает наибольшей величины в зоне сплавления углеродистой стали с аустенитной сталью или швом. Закономерности их развития могут быть выявлены с помощью металлографического и авторадиографического анализа [1, 8]. В исходном состоянии после сварки протяженность этих прослоек сравнительно невелика. Наибольшего развития прослойки достигают после выдержек при 800°С. Нагрев при температурах выше 900°С приводит к заметному их уменьшению.

Миграция углерода в зоне сплавления вызывается реактивной диффузией, которая обусловлена разной термодинамической стойкостью карбидов в контактируемых материалах и связана с реакцией образования на границе раздела со стороны легированной составляющей стойких карбидов за счет углерода,

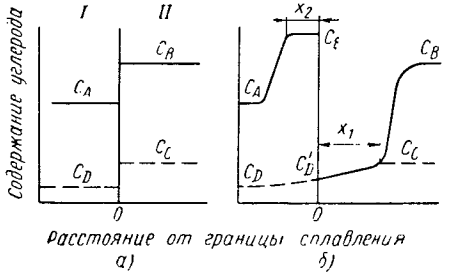


Рис. 4. Схема процесса реактивной диффузии в зоне сплавления нелегированного основного металла и легированного карбидообразующими элементами шва: *а* — исходное состояние; *б* — после отпуска; *I* — легированный шов; *II* — нелегированная сталь; C_A и C_B — концентрация углерода в шве и основном металле; C_C и C_D — концентрация растворенного углерода в основном металле и шве (для высоколегированных швов $C_D = 0$); C'_D — концентрации растворенного углерода в шве вблизи границы раздела; C_E — концентрации углерода в науглероженной прослойке

поступающего из нелегированной стали [8]. Ход процесса может быть представлен в соответствии со схемой, изображенной на рис. 4.

Интенсивность развития диффузионных прослоек определяется в первую очередь соотношением сил связи углерода с карбидами в контактируемых материалах. В контакте с углеродистой сталью диффузионные прослойки образуют швы, содержащие Mn, Cr, Mo, W, V, Nb и Ti. Фазовое состояние стали (феррит или аустенит) не определяет направления диффузионного процесса. Его влияние может сказаться лишь в случае изменения растворимости карбидов при переходе от структуры феррита к аустениту. Содержание углерода в основном металле или шве также не определяет направления процесса его миграции в зоне сплавления, а будет влиять лишь на ширину обезуглероженного и науглероженного участков. Углерод может диффундировать из основного металла в шов или, наоборот, из шва в основной металл в зависимости от соотношения содержания в них карбидообразующих элементов.

Ширина обезуглероженной прослойки

$$x^2 = \frac{C_C - C_D}{C_B} 2Dt, \qquad (4)$$

где D — коэффициент диффузии углерода в нелегированной составляющей; t — время процесса (остальные обозначения на рис. 4).

При постоянной температуре рост прослоек во времени подчиняется закону квадратичной параболы и в системе координат $x - \sqrt{t}$ отображается прямой линией (рис. 5, *б*). При одной и той же длительности выдержки рост прослоек с изменением температуры подчиняется экспоненциальной зависимости (рис. 5, *а*).

Расчет диффузионных прослоек по формуле (4) затруднен ввиду отсутствия данных о C_C и C_D. Если известны значения их после относительно кратковремен-

ных выдержек, можно с помощью параметрической зависимости [10] определить величины прослоек за весь срок эксплуатации изделия (до 10^4—10^5 ч).

Интенсивность процесса миграции углерода в зоне сплавления можно снизить в первую очередь за счет перехода от углеродистых сталей к низколегированным сталям с достаточным содержанием в них карбидообразующих элементов, необходимых для полного связывания углерода.

При соединениях разнородных малостабильных перлитных сталей могут использоваться следующие дополнительные меры, обеспечивающие снижение интенсивности процесса миграции углерода в зоне сплавления с высоколегированной сталью или швом:

предварительная облицовка кромок перлитной стали более стабильными перлитными швами;

введение промежуточных конструктивных элементов из более стабильных перлитных сталей;

ограничение температуры эксплуатации в месте сварного стыка;

отказ от термической обработки сваренного изделия или снижение температуры отпуска.

При сварке перлитных сталей целесообразно использовать аустенитные высоконикелевые электроды.

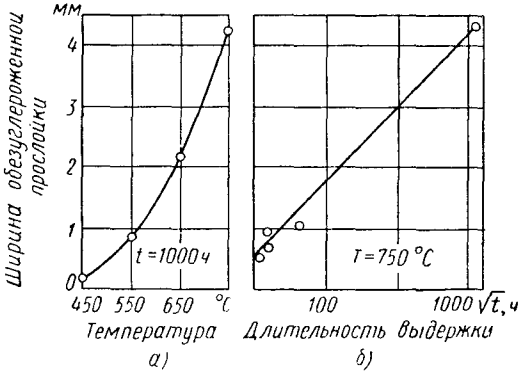


Рис. 5. Влияние длительности и температуры старения на протяженность обезуглероженной прослойки в зоне сплавления углеродистой стали (0,36% С) со швом типа Х16Н10: *а* — зависимость $x = f(T)$; *б* — зависимость $x = f(\sqrt{t})$

Свойства сварных соединений. При оценке свойств сварных соединений разнородных сталей наибольшего внимания заслуживает напряженное состояние в участках, примыкающих к зоне сплавления материалов с разными свойствами. При отсутствии в зоне сплавления развитых диффузионных прослоек и хрупких переходных участков шва свойства сварных соединений в интервале температур 20—450°С и в условиях воздействия как статической, так и вибрационной нагрузок определяются свойствами наименее прочной составляющей сварного соединения. Появление диффузионных прослоек в зоне сплавления приводит к повышению в последней объемного напряженного состояния и увеличению хрупкости пограничных участков шва, что способствует развитию в условиях испытания при комнатной и умеренных температурах малопластичных изломов. Переход к такому типу разрушения зависит от степени развития этих прослоек и наиболее заметно выражен в сварных соединениях среднеуглеродистых сталей с аустенитными швами, обладающими малым запасом аустенитности (композиций Х18Н9, Х25Н13 и др.) (рис. 6). Вероятность разрушений в зоне сплавления растет также со снижением температуры испытания. Переход к электродным материалам с повышенным запасом аустенитности (композиций Х15Н25М6, 2Х15Н35В3Б2) и особенно к составам на никелевой основе уменьшает опасность преждевременных хрупких разрушений в зоне сплавления. Малопластичные разрушения в зоне сплавления не возникают также при использовании стабильных перлитных сталей с достаточным запасом в них карбидообразующих элементов, исключающих появление диффузионных прослоек.

Наличие диффузионных прослоек в зоне сплавления разнородных сталей может оказывать также отрицательное влияние и на поведение сварных соединений при воздействии коррозии под напряжением в растворах щелочей и

нитратов. Чем более развиты диффузионные прослойки, тем меньше время до разрушения образцов, работающих в коррозионных средах. Разрушение при этом обычно проходит по обезуглероженной прослойке со стороны менее легированной стали.

Анализ условий длительной работы сварных соединений разнородных сталей при высоких температурах позволяет считать, что на стадии внутризеренного разрушения (при умеренных температуре и длительности эксплуатации) жесткость поля напряженного состояния в зоне сплавления будет затруднять сдвиговые деформации и тем способствовать упрочнению этой зоны. Поэтому при относительно невысоких температурах и сравнительно небольшой длительности испытания разрушение сварных соединений должно проходить вне зоны сплавления по наименее прочным основному металлу или шву.

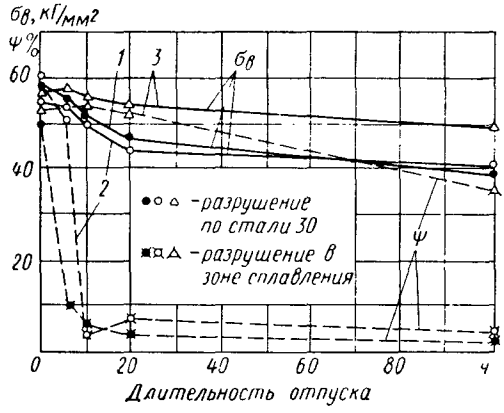


Рис. 6. Механические свойства при растяжении сварного соединения стали 30 с аустенитными швами разного легирования в зависимости от степени развития диффузионных прослоек, определяемой длительностью отпуска при температуре 700° С: *1* — шов типа Х18Н9; *2* — шов типа Х25Н12; *3* — шов типа Х15Н25М6

На стадии хрупкого межзеренного разрушения зона сплавления, наоборот, является наиболее вероятным очагом разрушения. Уровень длительной прочности и вероятность хрупких разрушений в этой зоне зависят от ряда факторов и сочетания свариваемых сталей, характера нагружения, температуры испытания и др.

Длительная прочность сварных соединений разнородных сталей при отсутствии диффузионных прослоек в зоне сплавления определяется соответствующими значениями ее для однородных соединений менее прочной стали. При наличии диффузионных прослоек длительная прочность рассматриваемых соединений может снижаться с развитием хрупких разрушений.

Остаточные сварочные напряжения. Распределение остаточных напряжений в сварных соединениях разнородных сталей непосредственно после сварки не отличается от обычно наблюдаемого в однородных сварных соединениях (рис. 7). Основным источником возникновения сварочных напряжений является в обоих случаях неравномерность разогрева изделия и жесткость соединяемых деталей. Различие характеристик термического расширения может не учитываться при оценке поля остаточных напряжений в изделии. В связи с этим сварные соединения из разнородных сталей, не подвергающиеся отпуску после сварки и работающие при комнатной или сравнительно умеренных температурах до 200—300°С (в зависимости от жесткости изделия), могут рассматриваться как обычные сварные конструкции из однородных сталей с неснятыми сварочными напряжениями.

Отпуск сварных конструкций из разнородных сталей одного структурного класса, так же как и из стали одного легирования, приводит к снятию сварочных остаточных напряжений, и влияние последних в отпущенных изделиях может не учитываться. Если свариваются стали разного структурного класса, то после отпуска в изделии неизбежно появление нового поля остаточных напряжений, обусловленных разностью термического расширения свариваемых элементов. 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 (рис. 8). В сварных соединениях перлитной стали с высокохромистой, наоборот, в перлитной части должны возникнуть напряжения растяжения, а в высокохромистой — напряжения сжатия. Аналогичные закономерности в распределении остаточных напряжений после отпуска наблюдаются и в изделиях с наплавленными поверхностными слоями.

При расчете поля остаточных напряжений, возникающих после отпуска, в рассматриваемых конструкциях [6, 9] за начальное состояние, свободное от напряжений, может быть принято состояние максимального нагрева изделия при отпуске (условно при температуре 650°С). Охлаждение изделия от этой

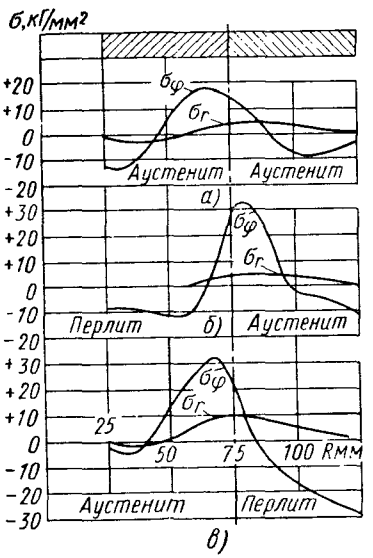


Рис. 7. Эпюры остаточных напряжений в сварных дисках с наружным диаметром 250 *мм*. Исходное состояние после сварки: *а* — диск с аустенитными ободом и центром; *б* — диск с аустенитным ободом и перлитным центром; *в* — диск с перлитным ободом и аустенитным центром

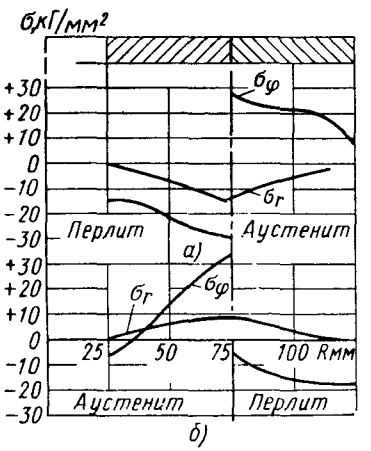


Рис. 8. Эпюры остаточных напряжений в сварных разнородных дисках диаметром 250 *мм*. Отпуск после сварки по режиму 650° С — 2 *ч*; *а* — диск с аустенитным ободом; *б* — диск с перлитным ободом

температуры представляет собой процесс его нагружения остаточными напряжениями за счет разности коэффициентов линейного расширения свариваемых сталей; наоборот, его нагрев от комнатной температуры обуславливает разгрузку конструкции от остаточных напряжений.

Анализ имеющихся расчетных и экспериментальных данных показывает, что уровень остаточных напряжений «отпуска» в первую очередь зависит от разности коэффициентов линейного расширения и свойств свариваемых материалов, жесткости конструкций и температуры ее работы. В отдельных случаях остаточные напряжения еще до полного охлаждения изделия могут достигнуть предела текучести. Тогда последующее охлаждение до комнатной температуры приведет к развитию местных пластических деформаций в первую очередь вблизи зоны сплавления. В отдельных случаях возможно также развитие обратных по знаку пластических деформаций и во время нагрева изделия до рабочих температур. В этом случае циклические нагревы и охлаждения при периодических пусках и остановках изделия могут приводить к накоплению местных

пластических деформаций и, в итоге, к исчерпыванию запаса пластичности материала.

Температура T, при которой в процессе охлаждения от температуры отпуска $T_{отп}$ в изделии возникнут пластические деформации, определяется по формуле

$$T = T_{отп} - \frac{a\sigma_{T_1}}{E(\alpha_1 - \alpha_2)}, \quad (5)$$

Температура T_p, при нагреве до которой от начальной температуры T_0, обычно принимаемой равной 20°С, в изделии возникнут пластические деформации обратного знака, чем при охлаждении,

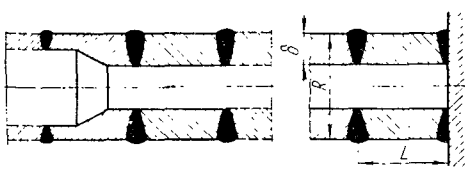
$$T_p = T_0 + 2a\frac{\sigma_{T_1}}{E(\alpha_1 - \alpha_2)}, \quad (6)$$

где σ_{T_1} — предел текучести менее прочной составляющей в $кГ/мм^2$;

α_1 и α_2 — коэффициенты линейного расширения свариваемых сталей [8];

a — коэффициент, зависящий от типа соединения.

Значения a равны: 2 — для стыка труб, расположенного вдали от элемента жесткости; 0,5 — для стыка труб, расположенного непосредственно у элемента жесткости; 1,07 — для композитного диска.



а) б)

Рис. 9. Рекомендуемое расположение комбинированных сварных стыков из сталей разного структурного класса для работы при высоких температурах:
а — стык труб разной толщины; б — расположение стыка вблизи жесткости

Влияние поля остаточных напряжений, вызванных разностью характеристик термического расширения свариваемых сталей, на работоспособность конструкции зависит от ряда факторов и прежде всего от температуры эксплуатации, сочетания свариваемых сталей и типа узла. Сварные конструкции из разнородных сталей (разного структурного класса), эксплуатирующиеся при комнатной температуре или при температурах до 200—300°С (в зависимости от сочетания свариваемых сталей и жесткости изделия), при оценке их работоспособности следует рассматривать как обычные сварные конструкции, не прошедшие отпуска после сварки. Остаточные напряжения при расчете прочности этих узлов можно в большинстве случаев не учитывать.

Для конструкций из разнородных сталей, работающих при более высоких температурах, в дополнение к основному расчету прочности от действия внешних нагрузок должен производиться также расчет от суммарного воздействия рабочих, остаточных и температурных напряжений. Основное внимание при этом должно уделяться возможности развития в изделии знакопеременных пластических деформаций во время циклических изменений температуры. В подобных конструкциях следует принимать меры к снижению уровня рабочих напряжений изгиба, действующих нормально к шву. С этой целью в сварных стыках толстостенных труб разной толщины желательно расположение стыка на участке большей толщины (рис. 9, *а*). Стыки должны быть удалены от элементов жесткости (рис. 9, *б*) на расстояние $L \geqslant 1{,}5\sqrt{R\delta}$.

Сварка разнородных сталей одного структурного класса

Сварка перлитных сталей. При сварке перлитных сталей разного легирования между собой целесообразно использовать сварочные материалы, применяемые обычно для менее легированной стали. Рекомендации по выбору электродных материалов приведены в табл. 3.

3. Сварочные материалы для сварки разнородных перлитных сталей

Предельная температура работы в °С	Марки свариваемых сталей		Метод сварки	Сварочные материалы	Режим термической обработки
400—450	20, 30 и другие малоуглеродистые	15ХМ, 12МХ, 20ХМЛ, 30ХМА	Ручная дуговая	Электроды типа Э42А	Без отпуска или отпуск при 630—650° С
			Под флюсом	Проволока Св-08А	
		Среднеуглеродистые и низколегированные конструкционные	В углекислом газе	Проволока Св-08ГС	
350—400		12Х1МФ, 15Х1М1Ф и 25Х3ВМФ, Х5М, Х5МФ	Ручная дуговая	Электроды типа Э-ХМ	Отпуск при 670—700° С
			Под флюсом	Проволока Св-10ХМ	
500	15ХМ, 12МХ, 20ХМЛ		В углекислом газе	Проволока Св-08ХГСМА	

При ручной дуговой сварке следует использовать электроды с фтористо-кальциевым покрытием, обеспечивающие высокую стойкость металла шва против кристаллизационных трещин и достаточную прочность сварного соединения. Применение электродов с руднокислым и органическим покрытиями не рекомендуется в связи с опасностью образования трещин в слоях шва, примыкающих к более легированной стали.

Технологические режимы сварки и прежде всего температуру подогрева желательно выбирать близкими к требуемым для более легированной стали. При сварке массивных изделий в отдельных случаях представляется целесообразным снизить температуру подогрева или совсем исключить последний путем предварительной облицовки кромок со стороны более легированной стали. Так, при сварке деталей из малоуглеродистой стали с деталями из хромомолибденовой стали подогрев может быть исключен, если предварительно облицевать кромку хромомолибденовой стали электродами типа Э42А. Толщина облицовочного слоя должна выбираться с таким расчетом, чтобы при сварке основного шва нагрев околошовной зоны и примыкающих к ней участков облицовки на толщину двух-трех слоев не вызывал бы появление в них закалочных структур.

При относительно небольшой разнице в легировании свариваемых перлитных сталей предельная рабочая температура сварного стыка может быть допущена близкой к предельной для менее легированной стали. Поэтому например, в соединениях углеродистой стали с хромомолибденовой сталью, содержащей до 1% хрома и 0,5% молибдена, или низколегированными конструкционными сталями максимальная рабочая температура определяется таковой для углеродистой стали и составляет 400—450°С. При этих температурах можно не опасаться заметного развития диффузионных прослоек в зоне сплавления хромомолибденовой стали со швом. Точно так же сварные соединения хромомолибденовой стали с хромомолибденованадиевой или 5%-ной хромистой сталью могут успешно эксплуатироваться до температур 500—520°С в соответствии с условиями работы изделий из хромомолибденовой стали. Механические свойства и длительная прочность таких соединений находятся на уровне свойств сварных соединений однородных сталей.

При сравнительно большой разнице в составе свариваемых сталей и прежде всего в содержании карбидообразующих элементов, за счет подбора шва не удается полностью подавить диффузию углерода в зоне сплавления, приводящую

к появлению в последней нежелательных переходных прослоек. Поэтому для таких сварных соединений необходимо ограничивать рабочую температуру изделия Так, например, для сварных соединений углеродистых сталей с хромомолибденованадиевыми в ответственных конструкциях предельная рабочая температура должна быть снижена до 300—350°С.

Сварка высокохромистых мартенситных, ферритных и ферритно-аустенитных сталей. Выбор электродных материалов для сварных соединений разнородных высокохромистых сталей определяется прежде всего требованиями получения швов без трещин и отсутствием в них хрупких участков. При сварке указанных сталей вследствие высокого содержания в них энергичного карбидообразующего элемента — хрома ожидать заметного развития диффузионных прослоек в зоне сплавления не следует. Рекомендации по выбору электродных материалов приведены в табл. 4.

4. Сварочные материалы для сварки разнородных высокохромистых сталей мартенситного, ферритного и ферритно-аустенитного классов

Условия работы	Марки свариваемых сталей		Метод сварки	Сварочные материалы	Режим термической обработки
При температуре до 600° С	12%-ные хромистые нержавеющие (1Х13, 2Х13, 0Х13)	12%-ные хромистые жаропрочные (15Х11МФ, 15Х12ВМФ, 18Х11МФБ, 15Х11В2МФ)	Ручная дуговая	Электроды типов ЭФ-13, ЭФ-Х11МНФ, ЭФ-Х11ВМНФ и ЭФ-Х12ВМНФ	Отпуск при 700—750° С
			Под флюсом	Проволока Св-0Х14ГТ	
			В углекислом газе		
В коррозионной среде и температуре до 600° С		Высокохромистые ферритные (Х25Т, Х17Н2) и феррито-аустенитные (Х21Н5Т, Х25Н5ТМФ и др.)	Ручная дуговая	Электроды типов ЭАФ-1МФ	Отпуск при 700—750° С (с ускоренным охлаждением)
				Электроды типов ЭА-2 и ЭА-2Г6	
			Под флюсом	Проволока Св-0Х21Н5Т	
В коррозионной среде при температуре до 300° С	Высокохромистые ферритные (Х17Т, Х25Т, Х28АЮ и др.)	Высокохромистые феррито-аустенитные (Х21Н5Т, Х25Н5ТМФ и др.)	Ручная дуговая	Электроды типа ЭАФ-1МФ	Отпуск при 700—850° С (в зависимости от сочетания сталей), ускоренное охлаждение
				Электроды типов ЭА-2 и ЭА-2Г6	

Если сваривают 12%-ные хромистые мартенситные или мартенситно-ферритные стали разного легирования между собой, то можно применять электродные материалы для любой из свариваемых сталей. При сварке под флюсом или в углекислом газе обычно используют в этом случае сварочную проволоку типа Св-08Х14ГТ. Режим подогрева следует выбирать по требуемому для более закаливающейся стали, имеющей, как правило, повышенное содержание углерода.

Температура подогрева в зависимости от жесткости конструкции и содержания в стали углерода может колебаться в пределах 200—400°С. После сварки обязателен отпуск при 700—750°С. Если толщина свариваемых элементов пре-

восходит 30 *мм*, то желательно сваренное изделие, не дожидаясь полного охлаждения, помещать в термическую печь для нагрева под отпуск.

При сварке 12%-ных хромистых мартенситных сталей с высокохромистыми ферритными и ферритно аустенитными сталями наиболее целесообразны сварочные материалы ферритно аустенитного класса. Преимущество их по сравнению с ферритными материалами (например, типа ЭФХ17) — малая склонность металла шва к росту зерна и высокая пластичность последнего в исходном состоянии после сварки. Температура подогрева таких соединений при сварке должна выбираться по режиму для 12%-ной хромистой стали. После сварки необходим отпуск при 700—750°С. В ходе термической обработки следует принимать меры к ускоренному охлаждению изделия во избежание проявления эффекта 475°-ной хрупкости. Так как коэффициенты линейного расширения высокохромистых мартенситных сталей и ферритно-аустенитных швов достаточно близки между собой, то отпуск изделия после сварки приводит к полному снятию сварочных напряжений. Проведение отпуска заметно повышает также коррозионную стойкость соединения прежде всего в районе околошовной зоны.

Распространена сварка высокохромистых сталей аустенитными электродами. В этом случае температура подогрева может быть снижена на 150—200°С против требуемой при сварке ферритно-аустенитными и ферритными электродными материалами. Изделие нет необходимости немедленно охлаждать после сварки. Следует, однако, учитывать, что сварное соединение будет характеризоваться значительной структурной неоднородностью. Вследствие заметной разницы в коэффициентах линейного расширения ферритной стали и аустенитного шва в изделии будут всегда иметься высокие остаточные напряжения.

Сварка аустенитных и ферритно-аустенитных сталей. При выборе сварочных материалов для сварки разнородных аустенитных сталей необходимо прежде всего учитывать склонность аустенитных швов наиболее распространенных составов к образованию горячих трещин при сравнительно небольшом отклонении легирования от оптимального. Процессы диффузионного перераспределения углерода в зоне сплавления для этих соединений так же, как и соединений высокохромистых сталей, в большинстве случаев могут не учитываться. Рекомендации по выбору сварочных материалов приведены в табл. 5.

Для предварительной оценки пригодности тех или иных сварочных материалов целесообразно использовать деление аустенитных сталей по свариваемости на две группы [7]. К первой из них относятся наиболее распространенные аустенитные стали, у которых содержание основного легирующего элемента — хрома превышает или близко к содержанию никеля. Эти стали могут свариваться аустенитно-ферритными сварочными материалами. Вторая группа охватывает стали с повышенным запасом аустенитности, у которых содержание никеля превосходит содержание хрома.

Если свариваются между собой разнородные стали первой группы, то могут использоваться аустенитно-ферритные электродные материалы как для той, так и для другой стали. В этом случае металл шва по содержанию основных легирующих элементов будет сравнительно мало отличаться от наплавленного и поэтому при обычных долях участия основного металла в шве при сварке можно обеспечить в последнем аустенитно-ферритную структуру. Выбор легирования аустенитно-ферритного наплавленного металла определяется условиями работы конструкции и требованиями к термической обработке последней. Если отношение Cr/Ni в стали близко к единице, то во избежание появления горячих трещин сварку корневых слоев желательно проводить электродами с повышенным содержанием ферритной фазы.

При сварке между собой сталей второй группы разного легирования аустенитно-ферритные электродные материалы применяться не могут, так как при повышении в шве содержания никеля за счет проплавления основного металла шов будет иметь однофазную аустенитную структуру и обладать склонностью к трещинообразованию. В данном случае могут использоваться сварочные материалы, обеспечивающие однофазную аустенитную или аустенитно-карбидную

5. Сварочные материалы для сварки разнородных аустенитных сталей

Группы сталей (по легированию)	Условия работы	Марки свариваемых сталей		Метод сварки	Структурное состояние шва	Сварочные материалы
1—1	В агрессивных средах	1Х18Н10Т	Х18Н12Т, Х17М13М2Т, Х17Н13М3Т, 0Х17Н16М3Т	Ручная дуговая	Аустенитно-ферритный	ЭА-1, ЭА-1а*
				Под флюсом	То же	Проволока Св-04Х19Н9
				В углекислом газе	»	Проволока Св-04Х19Н9С2
	В коррозионных средах			Ручная дуговая	»	ЭА-1Б, ЭА-1Ба*
				Под флюсом	»	Проволока Св-05Х19Н9, ФЗС2 или 0Х18Н9ФВС
	При температурах более 300° С		Х18Н12Т, 1Х16Н14В2БР, Х25Н20С2	Ручная дуговая	»	ЭА-1Ба, ЭА-1Б**
			1Х16Н13М2Б, Х23Н18, Х25Н13	То же	»	ЭА-1М2Фа, ЭА-1М2Ф**
1—11	При температурах до 700° С	1Х14Н8М2БР, ЭИ695Р	1Х15Н35В3Т (ЭИ612), Х15Н35В3ТР (ЭИ725)	То же	Аустенитно-карбидный	ЭА-4В3Б2, 2Х14Н8Б
				Под флюсом	Аустенитный	Проволока 06Х15Н35Г7В7М3Т (ЭП512)
1—11	В коррозионных средах	1Х18Н10Т, Х17Н13М2Т	Х21Н5Т, Х25Н5ТНФ	Ручная дуговая	Феррито-аустенитный	ЭАФ-1МФ
	При высоких температурах	1Х18Н9Т	Х14Н18В2БР	То же	Аустенитно-карбидный	ЭА-4В3Б2, 2Х14Н8Б
			Х15Н35В3Т Х20Н80Т2Ю	»	Аустенитно-карбидный, аустенитный	ЭА-4В3Б2, ЭА-3М6

* Для сварки конструкций, термически обрабатываемых после сварки.
** Для сварки корневых слоев.

структуру наплавленного металла при дополнительном легировании элементами, способствующими повышению его стойкости против горячих трещин. Необходимо при этом учитывать возможность образования трещин в переходных слоях шва. Так, электроды типа ЭА-3М6 не могут применяться при сварке аустенитных сталей, содержащих свыше 0,5% ниобия из-за опасности образования горячих трещин в участках шва, содержащих ниобий, за счет проплавления основного металла.

Выбор термической обработки сварных конструкций из разнородных аустенитных сталей определяется маркой стали, типом конструкции и условием ее работы. При сварке термически неупрочняемых сталей, отсутствии требований

к снятию сварочных остаточных напряжений и работе изделия в интервале умеренных температур термическая обработка может не производиться. Если по условиям изготовления или эксплуатации остаточные сварочные напряжения должны быть сняты, то достаточна стабилизация при температуре 800—850°С. Для конструкций, работающих при высоких температурах, предпочтительным видом термической обработки сваренного изделия является аустенизация при 1100—1150°С.

Сварка сталей разного структурного класса

Сварка перлитных сталей с высокохромистыми сталями мартенситного и ферритного классов. При сварке перлитных сталей с 12%-ными хромистыми сталями следует использовать электродные материалы перлитного класса. В этом случае обеспечивается удовлетворительная пластичность и вязкость переходных участков шва с содержанием до 5% хрома вблизи кромки разделки со стороны высоколегированной стали, а также более высокая длительная прочность сварных соединений при отсутствии хрупких разрушений в зоне сплавления (рис. 10).

По условию снижения до минимума диффузионных прослоек перлитный наплавленный металл должен легироваться определенным количеством карбидообразующих элементов. Так, при сварке углеродистых или низколегированных

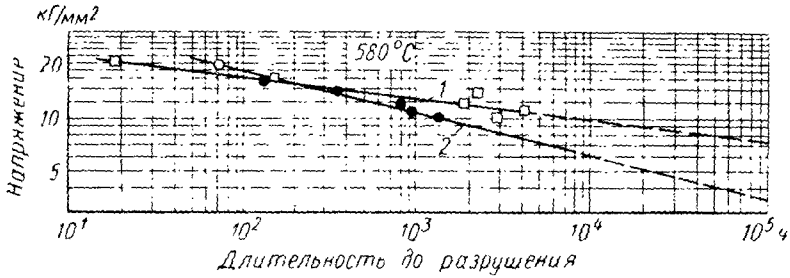


Рис. 10. Влияние легирования шва на длительную прочность сварных соединений перлитной стали марки 15Х1М1ФЛ с высокохромистой мартенситной сталью марки 18Х11МФБЛ: *1* — шов типа Э-ХМФБ (ЦЛ-27); *2* — шов типа Э-Х11ВМФ (КТИ-10); ● — разрушения в зоне сплавления

конструкционных сталей с 12%-ными хромистыми следует применять электроды типа Э-ХМ или соответствующую сварочную проволоку при сварке автоматической под флюсом, электрошлаковой или в углекислом газе. При больших толщинах свариваемых элементов в этом случае можно указанными электродными материалами производить лишь облицовку кромок со стороны высоколегированной стали, а заполненные разделки шва выполнять без подогрева электродами типов Э-42А и Э-50А в зависимости от требований к прочности перлитной стали.

Термический режим сварки должен выбираться по высоколегированной составляющей (12%-ной хромистой стали). При использовании в сварном соединении перлитных сталей с недостаточным содержанием в них энергичных карбидообразующих элементов температура эксплуатации стыка должна быть снижена против предельной для этой стали из-за опасности развития диффузионных прослоек в зоне сплавления. Если сварное соединение должно работать при более высоких температурах, чем указано в табл. 6, то можно либо ввести переходной элемент из более стабильной перлитной стали, либо использовать облицовку кромок со стороны 12%-ной хромистой стали последовательно сначала электродами типа Э-ХМФБ (или Х5М), затем Э-ХМФ и далее Э-ХМ.

6. Сварочные материалы для сварки перлитных сталей с высокохромистыми

Предельная температура работы в °С	Марки свариваемых сталей		Метод сварки	Сварочные материалы	Режим термической обработки
300—350	Малоуглеродистые 20, 15К и низколегированные конструкционные	12%-ные хромистые (0Х13, 1Х13, 2Х13, 15Х11МФ, 15Х12ВМФ, 15Х11МФБ)	Ручная дуговая Под флюсом В углекислом газе	Электроды типа Э-ХМ Проволока Св-10ХМ Проволока Св-08ХГСМА	Отпуск при 650—680° С
400—450	Хромомолибденовые (15ХМ, 12МХ, 30ХМ)		Ручная дуговая Под флюсом В углекислом газе	Электроды типа Э-ХМФ Проволока Св-08ХМФ Проволока Св-08ХГСМФА	Отпуск при 680—700° С
500—520	Хромомолибденованадиевые (12Х1МФ, 12Х1М1Ф)		Ручная дуговая В углекислом газе	Электроды типа Э-ХМФ Проволока Св-08Х2МФА	Отпуск при 700—720° С
580			Ручная дуговая	Облицовка кромок 12%-ной хромистой стали электродами типа Э-ХМФБ. Сварка шва электродами типа Э-ХМФ	
300	Хромомолибденовые (Х5М, Х5МФ)	12%-ные хромистые	То же	Электроды типа Э-Х5М	Отпуск при 700—740° С
	Малоуглеродистые и низколегированные конструкционные	Высокохромистые (Х17Т, Х25Т, Х28АП, Х25Н5ТМФ)	»	Электроды типов ЭАФ-1МФ, ЭА-2	Без отпуска или отпуск при 700—750° С с ускоренным охлаждением

Выбор режима термической обработки должен производиться в соответствии с требованиями к сварным соединениям 12%-ной хромистой стали. При опасности развития диффузионных прослоек температура отпуска должна быть несколько снижена.

При сварке перлитных сталей с высокохромистыми ферритными или ферритно-аустенитными сталями (с содержанием 17—28% хрома) применение электродных материалов перлитного класса нежелательно ввиду чрезмерного легирования переходных участков шва и опасности образования вследствие этого холодных трещин. Наиболее целесообразным является использование в данном случае электродов ферритно-аустенитного класса, обеспечивающих достаточную стабильность свойств шва при наличии значительного перемешивания с перлитной сталью. Может быть допущено также применение аустенитных электродов, однако при этом необходимо учитывать структурную неоднородность соединения.

Сварка перлитных сталей с нержавеющими и жаропрочными аустенитными сталями. При сварке перлитных сталей с аустенитными необходимо использовать электродные материалы аустенитного класса с достаточным запасом аустенитности наплавленного металла для предотвращения образования малопластичных участков с мартенситной структурой в корневых слоях и участках, примыкающих к перлитной стали. Рекомендации по выбору сварочных материалов в зависимости от сочетания сталей и условий работы конструкции приведены в табл 7.

Выбирая сварочный материал, необходимо учитывать также проплавление основного металла и со стороны аустенитной стали. По этому условию электродные материалы аустенитно-ферритного класса могут применяться лишь в сварных соединениях перлитных сталей с аустенитными сталями первой группы, у которых содержание хрома превышает содержание никеля или близко к нему. При сварке аустенитных сталей второй группы с перлитными должны использоваться лишь сварочные материалы, обеспечивающие однофазную аустенитную или аустенитно-карбидную структуру металла шва, стойкого против трещин в условиях возможного перемешивания с аустенитной и перлитной сталями. Подобные же сварочные материалы могут, очевидно, применяться и для сварки перлитных сталей с наиболее распространенными аустенитными сталями первой группы. Использование подобных сварочных материалов целесообразно и по условию уменьшения в зоне сплавления с перлитной сталью хрупких кристаллизационных прослоек.

Выбор материалов конструкции и условий ее работы должен производиться также с учетом требования снижения до минимума диффузионных прослоек в зоне сплавления аустенитного шва с перлитной сталью. В связи со значительной разницей между содержанием карбидообразующих элементов в аустенитном шве и перлитной стали интенсивность процесса миграции углерода в зоне сплавления является, очевидно, наибольшей.

Длительная прочность сварных соединений аустенитной стали с перлитной или высокохромистой мартенситной мало отличается от соответствующих значений для однородных соединений менее прочной стали. Наличие развитых диффузионных прослоек на 10—20% снижает длительную прочность этих соединений. Установлено, что рассматриваемые соединения в условиях длительной работы при температурах выше 500—550° С склонны к малопластичным разрушениям в зоне сплавления. Вероятность появления подобных разрушений возрастает с повышением температуры эксплуатации, интенсивности развития диффузионных прослоек и зависит от исходной прочности перлитной стали. Использование сталей, термически обработанных на повышенную прочность (в состоянии низкого отпуска), также повышает вероятность их появления. Одной из эффективных мер снижения опасности преждевременных разрушений в зоне сплавления сварных соединений перлитных сталей с аустенитными, работающих при высоких температурах, является устранение в этом участке возможных концентраторов в виде резкого изменения формы сечения.

7. Выбор сварочных материалов для сварки перлитных и мартенситных сталей с аустенитными и феррито-аустенитными сталями

Предельная температура работы в °С	Марки свариваемых между собой сталей		Метод сварки	Сварочные материалы
350*	Малоуглеродистые и низколегированные конструкционные	Аустенитные первой группы (1Х18Н9Т, 1Х18Н12Т, 1Х18Н12Б, Х17Н13М2Т, Х16Н13М2Б, Х23Н18, Х25Н13Т, Х17Н15М2Б)	Ручная дуговая	Электроды типов ЭА-2, ЭА-1М2Ф, ЭА-2Г6, ЭА-3М6, ЭА-4В3В2, на никелевой основе **
400*	Хромомолибденовые (12МХ, 15ХМ, 30ХМ, 20ХМЛ)			
520*	Хромомолибденованадиевые (12Х1МФ, 12Х1МІФ, 20ХМФЛ)			
580	Хромомолибденовые (Х5М, Х5МФ) и хромомолибденованадиевые (25Х3ВМФ 15Х2М2ФБС)		Под флюсом и аргонодуговая	Проволоки Св-07Х25Н13, Св-08Х20Н10Г6Т***
				Проволоки**** Х25Н12Т, Х25Н12ТЮ, Х20Н11М3Т6
$T_{раб}$ и марки перлитных сталей те же, что для сварных соединений перлитных сталей с аустенитными сталями первой группы (по свариваемости)		Аустенитные второй группы (Х14Н18В2БР, Х15Н35В3Т, Х16Н25М6)	Ручная дуговая	Электроды типов ЭА-3М6, ЭА-3М9, ЭА-4В3Б2, на никелевой основе**
350	Малоуглеродистые и низколегированные конструкционные	Феррито-аустенитные	Ручная дуговая	Электроды типов ЭА-3М6, ЭАФ-1МФ

* Температура эксплуатации может быть повышена до предельной для перлитной стали при внедрении промежуточных элементов или защитных облицовок перлитными стабилизированными электродами в соответствии с рекомендациями, приведенными на стр. 207.

** Являются предпочтительными для сварки конструкций, работающих при температурах выше 400—450° С.

*** При сварке среднеуглеродистых сталей с аустенитными.

**** При требовании стойкости шва против межкристаллитной коррозии.

Заметное подавление процесса миграции углерода в зоне сплавления может быть достигнуто при сварке электродами на никелевой основе (рис. 11) [3.6]. Эти сварочные материалы заслуживают предпочтения также и в связи с близостью коэффициентов линейного расширения шва и перлитной стали, что уменьшает дополнительные остаточные напряжения и приводит к повышению работоспособности изделия особенно в условиях воздействия значительного количества теплосмен при эксплуатации.

При изготовлении жестких узлов с большой толщиной свариваемых деталей, в процессе отпуска или эксплуатации конструкции возможны хрупкие разрушения в зоне сплавления перлитной стали с аустенитным швом. Их можно исключить при использовании сварочных материалов с повышенным содержанием никеля (например, электродов типа ЭА-3М6, ЭА-4В3Б2 и электродов на никелевой основе). Этими электродами можно заполнять всю разделку или лишь облицовочный слой с использованием для основной разделки электродов типа ЭА-2, ЭА-1М2Ф, или ЭА-2Г6. Возможность появления горячих и холодных трещин в зоне сплавления при введении облицовки заметно снижается.

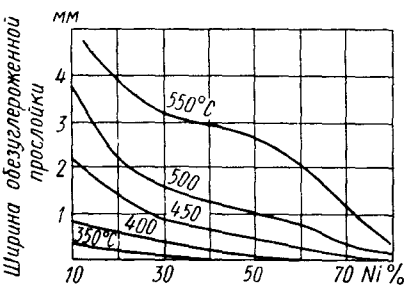


Рис. 11. Влияние содержания никеля в аустенитном шве (Cr ≈ const 15%) на ширину обезуглероженной прослойки в зоне сплавления со среднеуглеродистой сталью (0,36% C) после старения длительностью 10^5 ч в интервале температур 350—550° C[10]

Термическая обработка комбинированных узлов из закаливающейся при сварке легированной перлитной стали с аустенитной может быть необходима в первую очередь для устранения закалочных структур в околошовной зоне. Так же как и в сварных соединениях перлитной стали с высокохромистой, термическая обработка рассматриваемых конструкций не может привести к снятию остаточных сварочных напряжений, а вызовет лишь их перераспределение. Поэтому в сварных соединениях малоуглеродистых сталей с аустенитными термическая обработка после сварки может не производиться. При использовании в сварном соединении закаливающейся перлитной стали вначале на свариваемых кромках может быть выполнена облицовочная наплавка аустенитными электродами и произведен отпуск для снятия закалки в околошовной зоне. Последующая сварка основного шва может уже производиться без подогрева, и отпадает необходимость в последующем отпуске.

При термической обработке рассматриваемых сварных соединений необходимо учитывать возможность коробления конструкции в результате перераспределения остаточных напряжений. Деформация конструкции является наибольшей при несимметричном расположении швов в изделии. При симметричном расположении швов, например в сварных стыках труб, величина коробления мала и ее можно не учитывать.

СВАРКА РАЗНОРОДНЫХ СПЛАВОВ

Особенности сварки

Для большинства пар разнородных металлов или сплавов, которые приходится сваривать, характерным являются существенные различия в температуре плавления, удельном весе, коэффициентах теплофизических свойств, особенно линейного расширения. Отличаются также и кристаллографические характеристики — тип решетки и ее параметры (табл. 8).

8. Физические и механические свойства некоторых металлов, используемых при сварке разнородных пар

Свойства	Металлы								
	Al	Ti	Fe	Ni	Cu	Zn	Nb	Mo	Ta
Атомный номер . . .	13	22	26	28	29	30	41	42	73
Атомный вес	26,98	47,90	55,85	58,69	63,54	65,38	92,91	95,95	180.88
Плотность в $г/см^3$ . .	2.7	4.5	7,87	8,9	8,96	7,13	8,6	10,2	16,6
Температура плавления в ° С	660	1680	1539	1455	1083	419	2470	2622	2995
Коэффициент теплопроводности (при 20°С) в кал/см·сек °С	0.55	0.036	0.22	0.22	0,95	0.27	0,12	0,34	0,13
Удельная теплоемкость (0—100° С) в *кал/*° С	0,217	0,13	0,11	0.11	0.09	0.09	0,06	0.065	0,036
Коэффициент линейного расширения (0—100° С) $1/1° С \times 10^6$	23,5	8.3	11,7—12,3	13,0	16,5	33,0	7,2	5,1	6,6
Тип пространственной решетки	Кубическая гранецентрированная	Плотноупакованная гексагональная (α-Ti)	Кубическая объемноцентрированная	Кубическая гранецентрированная		Гексагональная плотноупакованная	Объемноцентрированная, кубическая		
Параметры решетки	4,04	$a = 2,95$ $c = 4,68$ (α-Ti)	2,86	3,52	3,61	$a = 2.67$ $c = 4.94$	3,29	3,14	3,30
Наименьшее межатомное расстояние в Å	2.86	2,91	2,48	2,49	2,55	2,66	2,85	2,72	2.85
Твердость *НВ*	15	140—200	80	60—70	37	30	90—120	190—200	80—120
Предел прочности в $кГ/мм^2$	8—10	45—56	25—30	45—56	20—24	15	28—30	50—55	35
Предел текучести в $кГ/мм^2$	5	35—50	—	14—40	—	—	15—17	35	—
Относительное удлинение в %	20—40	25—27	40—50	35—50	50	20	40—50	55	25—40
Модуль нормальной упругости в $кГ/мм^2$	7 000	11 250—11 700	21 000	20 500—23 000	10 800—11 700	13 000	8700	28 000—31 800	18 800

Однако наибольшие затруднения обусловлены тем, что в большинстве случаев при ограниченной взаимной растворимости для основных комбинаций свариваемых металлов чрезвычайно трудно избежать образования стойких интерметаллических фаз, обладающих большой твердостью и хрупкостью. Основные интерметаллические фазы указаны в табл. 9.

Так, в паре Fe—Al образуются соединения $FeAl_3$ и Fe_2Al_5, которые имеют микротвердость порядка 800—900 *кГ/мм*^{2}. Наиболее хрупкой фазой является Fe_2Al_5. В паре Al—Ni (при сварке сталей 18-8 и алюминия) образуются интерметаллиды NiAl и Ni_3Al, обладающие большой хрупкостью. Фаза Ni_3Al имеет пластичность, равную нулю, однако пластичность фазы NiAl может быть увеличена, например, нагревом и гомогенизацией фазы при 1150°С (в течение 48 *ч*) либо при 1315°С (в течение 6 *ч*), а также за счет измельчения зерна этой фазы при добавке 0,5% Mo [41]. На рис. 12 в качестве примера показаны некоторые типовые прослойки, получающиеся при сварке алюминия с никелем.

В связи с отмеченными особенностями и трудностями сварки разнородных металлов и их сплавов наиболее успешно удается сваривать отдельные пары металлов способами и приемами, при которых обеспечивается:

1) минимальное время контактирования соединяемых металлов в жидком состоянии, что уменьшает размеры прослоек хрупких интерметаллидов, либо даже предотвращает их возникновение [31, 38];

2) надежная защита металла при сварке плавлением от действия окружающего воздуха;

3) предотвращение образования хрупких интерметаллидов подбором промежуточных или комбинированных из разных металлов вставок, хорошо сваривающихся с каждым элементом свариваемой пары [13, 14, 23];

4) подавление роста интерметаллических хрупких фаз легированием металла шва некоторыми компонентами [7, 30].

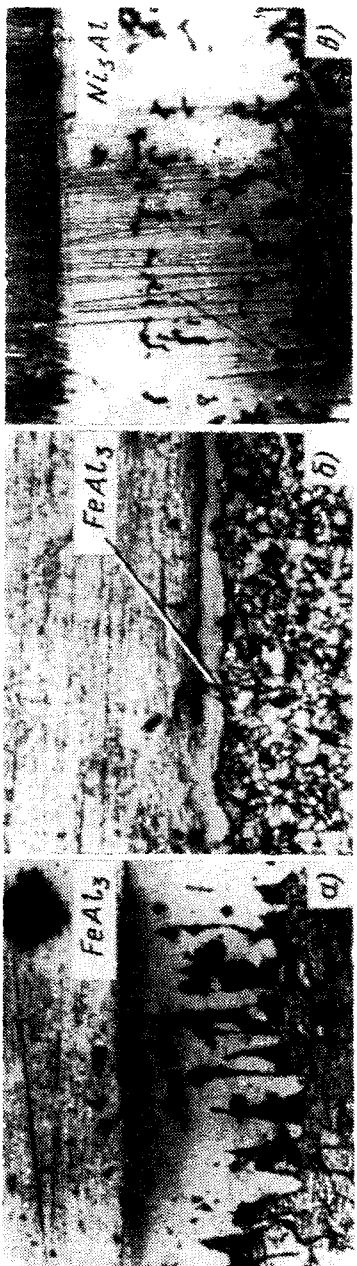


Рис. 12. Типовые прослойки интерметаллидов при сварке алюминия со сталью и никелем: *а* — при алитировании стали и последующей сварке; *б* — при сварке по оцинкованной стали; *в* — при наплавке алюминия на никель

9. Основные варианты свариваемых пар разнородных металлов и применяемых способов сварки

Соединяемые металлы или сплавы	Способы сварки		Основные особенности физико-химического взаимодействия	
	плавлением	давлением	Образование растворов	Образование стойких интерметаллических соединений
Сталь+алюминий и его сплавы	Аргоно-дуговая	Холодная; контактная, диффузионная, трением, взрывом	До 33% Al в α-Fe	$FeAl_3$ и Fe_2Al_5
Сталь+медь и ее сплавы	Аргоно-дуговая, по слою флюса, электронно-лучевая, сжатой дугой, электроплазковая	Трением, взрывом	До 8% Cu в γ-Fe До 1,4% Cu в α-Fe	—
Сталь+титан	Аргоно-дуговая	Диффузионная	0,5% Fe в α-Ti До 25% Fe в β-Ti	FeTi; Fe_4Ti
Сталь+молибден	То же	—	До 6,7% Mo в α-Fe	FeMo; Fe_7Mo_4
Сталь+ниобий	»	—	До 1,8% Nb в α-Fe До 1% Nb в γ-Fe	FeNb; Fe_2Nb; Fe_3Nb_2
Алюминий+медь	Аргоно-дуговая; по слою флюса	Холодная, контактная	До 9,8 Al в Cu	$CuAl_2$
Алюминий+титан	Аргоно-дуговая	Диффузионная, трением	До 6% Al в α-Ti	TiAl; $TiAl_3$
Титан+тантал	То же	Диффузионная	Непрерывный ряд	—
Медь+титан	»	Диффузионная	2,1% Cu в α-Ti До 17% Cu в β-Ti	TiCu; Ti_2Cu; Ti_2Cu_3
Медь+молибден	Электронно-лучевая	—	Ограниченная растворимость	—
Медь+тантал	То же	—	Не образуют	—

Процесс образования прочных связей в сварном соединении можно разбить на две стадии [31]:

1) подготовительную — сближение соединяемых металлов на расстояния, при которых может возникнуть межатомное взаимодействие, что достигается в процессе смачивания твердой поверхности жидкой фазой, за счет совместной пластической деформации двух твердых веществ или за счет диффузионных процессов;

2) конечную — образование прочного соединения, когда определяющую роль играют квантовые процессы электронного взаимодействия, приводящие к металлической (чистые металлы) либо к ковалентной (металлы, химические соединения, окислы) связи.

Для первой стадии характерным является физическое взаимодействие (этап *А* на рис. 13), а для второй — химическое (этап *Б* на рис. 13), длительность и условия протекания которых определяют прочность сварного соединения, а также возможность появления химических соединений.

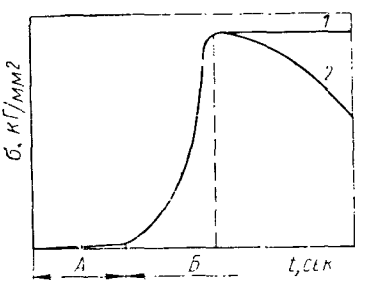


Рис. 13. Схема изменения прочности сварного соединения в процессе физического (*А*) и химического (*Б*) взаимодействия контактирующих поверхностей [31]: *1* — процесс растворения; *2* — процесс образования химического соединения

Протекание в контакте соединяемых элементов процессов электронного взаимодействия указанных типов требует определенной энергии для активации поверхности. Эта энергия может быть тепловой (термическая активация), механической (механическая активация) или радиационной (радиационная активация).

В случае соединения разнородных металлов из-за периода релаксации энергии процессы диффузии затруднены и химическое взаимодействие происходит с опозданием (замедлением или ретардацией).

В связи с этим, если длительность контактирования жидкого и твердого металла в разнородном соединении меньше этого периода ретардации (замедления), вполне возможно получение соединения разнородных металлов с ограниченной растворимостью без промежуточных хрупких прослоек.

Расчеты показывают, что, например, при сварке пары Al + Ti при взаимодействии жидкого алюминия с твердым, нагретым титаном, период ретардации, при котором в соединении отсутствуют хрупкие фазы, составит: 170 *сек* при температуре алюминия 700°С; 9 *сек* при 800°С и 1 *сек* при 900°С.

Однако сварка без хрупких фаз во многих случаях затруднена тем, что в реальных сварных соединениях площади контакта велики и сам контакт происходит не по всей поверхности одновременно, в результате чего, если исходить только из так называемого периода ретардации и стремления получить соединение без хрупких фаз, практически возможно соединение с «разрывным» контактом, т. е. такое соединение, когда связи установились только в отдельных местах. Прочность такого соединения может быть совершенно неудовлетворительной. Поэтому в ряде случаев, особенно при крупногабаритных деталях, приходится выбирать такое время контактирования, при котором заведомо образуется плотный и равномерный слой интерметаллидов, осуществляющий надежную связь соединяемых металлов, но с более низким уровнем прочности.

Следует отметить, что имеются только отдельные примеры расчетного определения параметров нагрева и длительности контактирования. Из способов сварки плавлением наиболее тонкое регулирование нагрева более тугоплавкого металла свариваемой пары и степени нагрева легкоплавкого металла достигается только при использовании независимого источника нагрева, т. е. плазменной струей, либо сваркой или наплавкой независимой дугой [9,19].

Для осуществления быстрого и равномерного контакта свариваемых жидкого легкоплавкого металла и нагретого тугоплавкого металла поверхность последнего не должна быть загрязнена, окислена и т. п. Предохраняет поверхность от окисления при нагреве, уменьшает энергию активации, улучшает смачиваемость и стабилизирует контакт между жидким легкоплавким металлом и нагретой поверхностью предварительное покрытие ее поверхностно активным слоем.

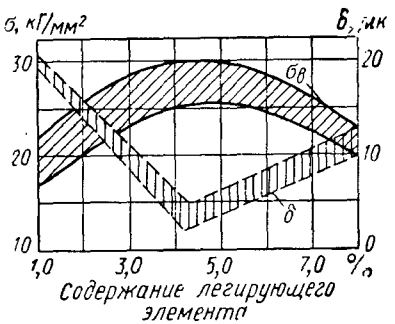


Рис. 14. Зависимость предела прочности при растяжении сварного соединения стали с алюминием от толщины δ интерметаллической прослойки (график построен по экспериментальным работам [4, 30])

Для этой цели могут быть применены покрытия [7,42]:

1) цинковое толщиной 30—50 *мк*, наносимое гальваническим путем либо горячим цинкованием;

2) из чистого алюминия толщиной 0,1—0,2 *мм*, наносимое алитированием;

3) комбинированное медно-цинковое;

4) комбинированное никель-цинковое.

Регулировать толщину соединительных прослоек, имеющих в своем составе интерметаллиды, и прочность всего соединения можно способом, связанным с легированием металла шва некоторыми элементами. Например, при сварке алюминиевых сплавов АМц и АМг-6 и оцинкованной стали [30] толщина прослойки значительно уменьшается при введении через присадочную проволоку кремния (до 5%), меди (до 2,5%) и цинка (до 7%).

Зависимость прочности сварного соединения от толщины интерметаллической прослойки показана на обобщенном графике рис. 14.

Длительность нагрева и контактирования соединяемых элементов при сварке плавлением можно регулировать смещением источника тепла на один из элементов (обычно легкоплавкий), при контактной сварке — использованием электродов разного размера и сечения, применением теплоотводов и т. п.

Наиболее универсальным с точки зрения надежной защиты металлов от действия окружающего воздуха оказался способ аргоно-дуговой сварки, но для таких металлов, как титан, ниобий, тантал, молибден, наилучшие условия обеспечиваются при сварке в вакууме (электроннолучевой или диффузионной).

Сварка алюминия и его сплавов со сталью

Аргоно-дуговая сварка [3, 4, 7, 26, 29, 30]. Данным методом возможно получение всех основных типов сварных соединений. Подготовка стальной детали под сварку предусматривает для стыкового соединения двусторонний скос кромок по углом 70° к вертикали, так как при таком угле скоса прочность соединения достигает максимальной величины (рис. 15, *а*). Свариваемые кромки тщательно очищают (механической обработкой, пескоструйным способом, химическим травлением; нежелательна дробеструйная очистка, так как на поверхности металла остаются окисные включения) и подают на операцию, связанную с нанесением покрытия (поверхностноактивного слоя).

Для углеродистых и низколегированных сталей наиболее дешевым способом нанесения покрытия является цинкование. Процессу гальванического и горячего цинкования должны предшествовать промывка и сушка детали, травление в растворе кислоты с последующей промывкой и сушкой. При горячем цинковании деталь перед опусканием в цинковую ванну (температура 470—520° С) флюсуют.

При гальваническом нанесении покрытия слой цинка должен достигать 30—40 *мк*; при горячем цинковании 60—90 *мк*. В последнем случае значительно облегчается процесс нанесения слоев алюминия, особенно на мелких деталях.

Для аустенитных сталей (1Х18Н9Т и т. п.) алитирование можно производить после механической очистки без применения флюса. Оптимальный (по прочности соединения) режим алитирования — температура алюминиевой ванны 750—800° С. Время выдержки при алитировании 1—5 *мин* в зависимости от размеров детали. Возможно также алитирование стальных деталей с применением токов высокой частоты [4]. При алитировании конструкционных сталей после очистки поверхности перед алитированием обязательно флюсование детали в насыщенном водном растворе флюса. Простейший флюс состоит из двух компонентов 50% KF + 50% KCl. Совершенно недопустимо нанесение цинкового или алюминиевого покрытия по методу шоопирования, так как при этом частицы

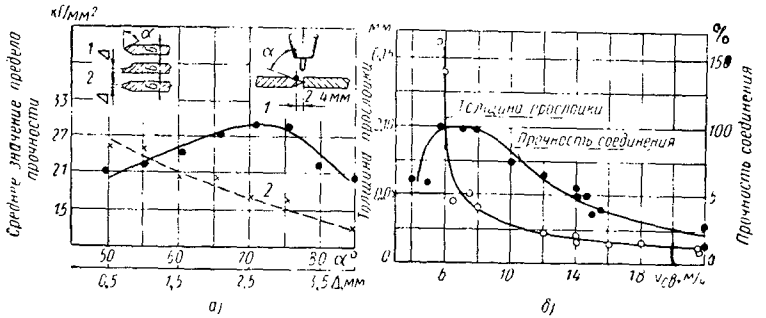


Рис. 15. Зависимость предела прочности при растяжении сварного соединения стали с алюминием от: *а* — угла разделки кромки стального элемента [29]; *б* — толщины прослойки и скорости сварки [4, 7]

покрытия успевают окисляться и удовлетворительно сварить алюминий со сталью не удается.

Сварка производится с использованием стандартных сварочных установок типа УДАР-300 и УДАР-500, лантанированных вольфрамовых электродов диаметром 2—5 *мм* и аргона классов А — В по ГОСТу 10157 —62. Особенностью сварки алюминия со сталью в сравнении с обычным процессом аргоно-дуговой сварки алюминиевых сплавов является расположение дуги, которое должно в начале сварки первого шва удерживаться на присадочном прутке, а в процессе сварки остальных швов — на присадочном прутке и образующемся валике (рис. 16, *а*); этим предупреждается преждевременное выгорание покрытия. Возможен и иной вариант, когда дуга ведется по кромке алюминиевой детали, а присадка — по кромке стальной таким образом, что жидкий алюминий натекает на поверхность стали, покрытой цинком или алитированной. При сварке, в зависимости от типа соединения, необходимо соблюдать последовательность наложения валиков шва (рис. 16, *б*).

Величина сварочного тока зависит от толщины свариваемого металла. При толщине до 3 *мм* сварочный ток должен быть 110—130 *а*; при толщине стали 6—8 *мм* сварочный ток 130—160 *а*, при толщине 9—10 *мм* — ток 180—200 *а*.

В качестве присадочного материала применяется проволока марки АД-1 (чистый алюминий с небольшой присадкой кремния, благоприятно влияющего на формирование диффузионной прослойки стабильного качества), либо проволока из сплава АК-5. Присадку из сплава АМг-6 применять не следует, так как она дает меньшую прочность соединения. Это объясняется тем, что в этом случае в формировании интерметаллидного слоя принимает участие магний (до 1—2%), наличие атомов которого вместо атомов алюминия в кристаллической решетке одной из фаз обуславливает появление слабых связей, так как магний практически

не растворим в железе. При диффузионной сварке [37] магний также препятствует сварке алюминия со сталью. Это объясняется тем, что магний резко ускоряет рост прослойки из хрупких интерметаллидов, интенсифицируя развитие процессов реактивной диффузии.

Важное значение имеет правильный выбор скорости сварки, так как она определяет время взаимодействия жидкого алюминия со сталью, т. е. толщину и стабильность соединительного диффузионного слоя (рис. 15, *б*). Для первых слоев скорость сварки назначается в интервале 7—10 *м/ч*, для последующих (когда сталь достаточно разогрета) 12—15 *м/ч*.

При сварке по гальванически оцинкованным кромкам стали статическая прочность соединения при разрыве соответствует прочности алюминия (10 *кГ/мм*²). При нанесении на кромки слоя алюминия (путем алитирования или с помощью т.в.ч.) статическая прочность соединения повышается на 30—40%. ($\sigma_в = 13 \div 18$ *кГ/мм*²). Повысить прочность соединения в целом можно увеличением рабочего сечения шва.

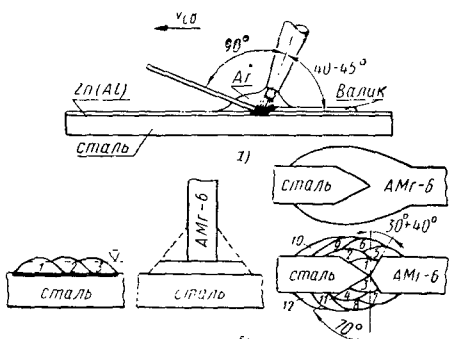


Рис. 16. Аргоно-дуговая сварка алюминиевых сплавов со сталью: *а* — схема ведения; *б* — последовательность наложения валиков шва в зависимости от типа соединения

Сварные соединения имеют высокую усталостную прочность при действии знакопеременной изгибающей нагрузки (рис. 17). При базе 10^7 циклов предел усталости равен 5—6 *кГ/мм*², т. е. находится на уровне, обычном для сплава АМг-6. Разрушение образцов, как правило, происходит на сплаве АМг-6 у внешнего концентратора. Соединения труб и судовых конструкций имеют высокую плотность при гидравлических, пневматических и вакуумных испытаниях. Они обладают высокой коррозионной стойкостью в морской воде и на воздухе при окраске их обычными для алюминиевых сплавов покрытиями (АЛГ, ФЛ и т. п.) [5].

Сварку стали с алюминием можно выполнять с применением комбинированных покрытий стали: медно-цинкового и никель-цинкового [7,26, 42]. В первом случае на сталь Ст. 3 наносят слой меди толщиной 4—6 *мк*, а затем слой цинка толщиной 30—40 *мк*. Во втором случае сначала наносят слой никеля толщиной 5—6 *мк*, а затем слой цинка 30—40 *мк*. Режим аргоно-дуговой сварки образцов толщиной 3 *мм*: ток 80—120 *а*; скорость сварки 12 *м/ч*; присадочный пруток диаметром 3 *мм* марки АД-1; расход аргона 6—8 *л/мин*. Соединительная прослойка интерметаллидов сложного состава получается несколько меньшей толщины и твердости. Предел прочности при растяжении (при усилении шва) при медно-цинковом покрытии 18,7 *кГ/мм*²; при никель-цинковом покрытии 20,3 *кГ/мм*².

Легирующие элементы, вводимые в шов, повышают прочность соединения. Например, если сталь 1Х18Н9Т имеет только цинковое покрытие при толщине в 50 *мк*, достигается прочность соединения 25,4 *кГ/мм*², если по подслою цинка толщиной 25—30 *мк* производится алитирование, прочность соединения достигает 31,5 *кГ/мм*².

Процесс аргоно-дуговой сварки алюминия и его сплавов со сталью может быть механизирован.

Холодная сварка давлением происходит за счет схватывания двух металлов в процессе их деформирования при условии, что минимальная деформация обжатия не ниже 70—80%. Перед холодной сваркой поверхности должны быть тщательно очищены не только от окислов, но и любых поверхностных пленок, включая адсорбированные поверхностью газы. Прочность соединения изменяется в пределах 8—10 *кГ/мм*².

Сварка трением [39, 40] производится на режимах, при которых процесс расплавления алюминия и нагрев стыка значительно сокращен, что препятствует образованию значительной прослойки хрупких интерметаллидов. Так, для стержней диаметром 16 и 20 *мм* из алюминия марки А0, АД1, алюминиевых сплавов АМц, АМг, АВ, Д16 и сталей Ст. 3, 1Х18Н9Т были получены следующие результаты.

Соединение стержней из Ст. 3 и стали 1Х18Н9Т с алюминием АД1 легко осуществляется, оно имеет предел прочности при растяжении 9 *кГ/мм*^{2} и угол загиба 180°. Соединение стали 1Х18Н9Т со сплавами АМц и АВ осуществимо и имеет предел прочности при растяжении 13 *кГ/мм*^{2} и угол загиба 180°. Соединение стали Ст. 3 и 1Х18Н9Т с другими алюминиевыми сплавами осуществить не удалось.

Контактная точечная сварка [20] алюминия с алитированной сталью требует выполнения следующих операций. Сталь (толщиной 1,5—2 *мм*) после пескоструйной очистки подвергается алитированию (обычным способом или с применением т.в.ч.). Подготовленные таким образом стальные листы соединяют с алюминиевыми сплавами АМг, Д16 (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 *кГ/мм*^{2}.

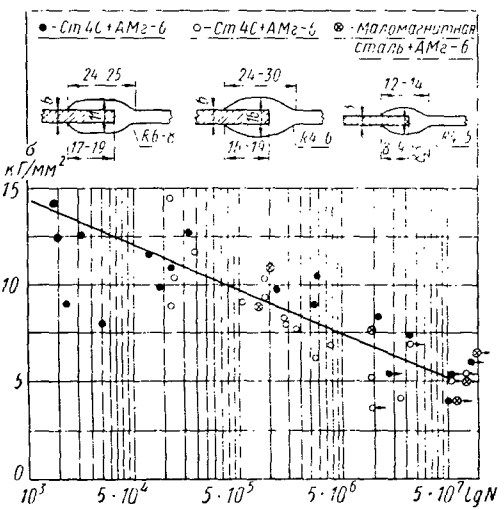


Рис. 17. Результаты усталостных испытаний сварных соединений из сплава АМг-6 и стали [6, 7]

Диффузионная сварка [17, 37] алюминия марки АД0 со сталью 1Х18Н10Т производилась на прутках диаметром 25—32 *мм*. Контактные поверхности образцов непосредственно перед сваркой обрабатывались механическим способом до 4—5-го класса чистоты. Разрежение в камере 10^{-3}—$5 \cdot 10^{-4}$ *мм рт.ст.*, нагрев металла до 500° С, давление 0,75 *кГ/мм*^{2}. Максимальная прочность соединения около 9 *кГ/мм*^{2} достигается при выдержке около 30 *мин*. При указанных условиях в месте соединения образуется переходная зона шириной 4—6 *мк* с микротвердостью 50—140 *кГ/мм*^{2}.

Сварка взрывом [32] осуществлялась для алюминия марки АДН толщиной 1,5—4 *мм* со сталью 1Х18Н9Т толщиной 1,5—15 *мм*. Для этой пары свариваемых металлов прочность соединения на срез оказалась равной 7,2 *кГ/мм*^{2}.

Анализ структуры соединения показывает, что при действии ударной взрывной нагрузки соединяемые металлы совместно образуют волнообразную поверхность по линии соединения, в результате чего между ними возникают металлические связи. В связи с кратковременностью процесса (микросекунды) в контакте отсутствуют хрупкие фазы.

Сварка меди и ее сплавов со сталью [9, 10, 16, 18, 19, 24, 25, 32, 34, 36]

В равновесном состоянии при комнатной температуре медь растворяется в α-Fe в количестве до 0,3%, а железо в меди в количестве до 0,2%. Хрупких интерметаллидов не образуется. В связи с большими скоростями охлаждения при

сварке в переходном слое возникает 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 включениями фазы, обогащенной железом. Со стороны стали, примыкающей к шву, размер зерна увеличивается в пределах зоны шириной 1,5—2,5 *мм*. Микротвердость зоны сплавления достигает 580—620 *кГ/мм*^{2}.

Ухудшает взаимную растворимость железа и меди наличие в стали углерода, а улучшает марганец и кремний. Марганец 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.

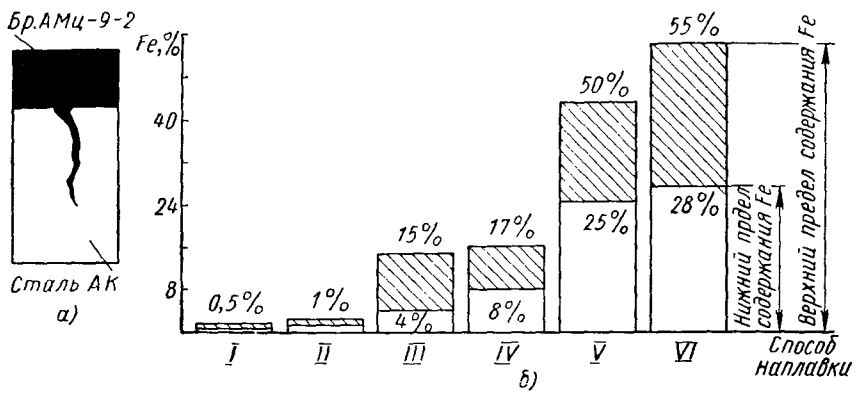


Рис. 18. Сварка меди со сталью: *а* — трещина в стали под слоем наплавки, заполненная сплавом [36]; *б* — содержание железа в металле наплавки в зависимости от способа наплавки меди на сталь [9]: *I* — плазменной струей с токоведущей присадочной проволокой и двойной независимой дугой; *II* — расплавлением облицовки; *III* — автоматическая под слоем флюса лентой; *IV* — лежачим электродом под слоем флюса; *V* — электродом «Комсомолец»; *VI* — автоматическая под слоем флюса электродной проволокой

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 величинами коэффициентов 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 (рис. 18, *а*), что объясняется расклинивающим действием жидкой меди, проникающей в микронадрывы в стали по границам зерен при одновременном действии термических напряжений растяжения. Однако на углеродистых и низколегированных сталях (Ст. 3, СХЛ4 и т. п.) трещин мало и размеры их невелики. В сталях, содержащих повышенное количество легирующих элементов, в частности типа 18-8, число и размеры трещин резко возрастают.

Для сталей типа 18-8 эффективным средством борьбы с трещинами является предварительная наплавка подслоя с ферритной фазой. Так, при содержании феррита свыше 30% проникновения меди в сталь не наблюдается. Это объясняется тем, что феррит не смачивается медью и проникновения меди в микронадрывы не происходит.

Чтобы уменьшить опасность образования в стали трещин, рекомендуется вести сварку на минимальной погонной энергии, в качестве присадочного металла применять никелевый сплав МНЖ5-1 или бронзу Бр. АМц 9-2. Наличие никеля и алюминия в жидком металле снижает 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 дуга несколько смещается в сторону меди или ее сплавов. При этом необходимо учитывать следующее.

Оптимальные условия наплавки меди на сталь требуют, чтобы не было расплавления стали и она хорошо смачивалась (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 *сек*. Чтобы выдержать эти условия, нужно сделать расчеты температурно-временного режима сварки и наплавки, методика которого изложена в работе [9]. Такие расчеты и данные рис. 18, *б* показывают, что для соединения меди и ее сплавов со сталью лучше всего применять аргоно-дуговую сварку, а для наплавки цветных металлов на сталь — наплавку плазменной струей с токоведущей присадочной проволокой [9, 19].

Для сварки меди, бронз Бр. АМц 9 2, Бр. КМц 3-1, латуни Л90 со сталями типа Ст. 3, Ст. 4, 10, 09Г2 применяются: при ручной сварке электроды типа «Комсомолец», для сварки под флюсом ОСЦ-45 проволока марки Бр. КМц 3-1, под флюсом АН-26 проволока марки Бр. Х0,5, а при сварке в среде защитных газов проволоки марок Бр.КМц3 1, Бр.АМц 9-2, МНЖ5-1. В ряде случаев необходим предварительный подогрев изделия.

Режимы сварки во всех случаях назначаются такими же, как и при сварке меди или ее сплавов. При различной комбинации электродных проволок (Бр.ОФ 6,5-1,5, Бр.АМц 9-2, Бр. КМц 3-1, Бр. АНСМц 10-3-1,5) и флюсов (АН-20, АН-26, АН-60) при наплавке получается металл с твердостью в пределах *НВ* 90—180 *кГ/мм*^{2}.

При указанных сварочных материалах и способах сварки обеспечивается равнопрочность сварного соединения (по цветному металлу) при действии статической нагрузки. Для сварного соединения медь М3С + сталь предел прочности 21—24 *кГ/мм*^{2}, для соединения сплав МНЖ5-1 — сталь предел прочности 28—36 *кГ/мм*^{2}. Сварные соединения обладают удовлетворительной пластичностью: так, для соединения меди М3С или сплава МНЖ5-1 со сталью СТ.4С при ручной сварке угол загиба 40—85°, а при аргоно-дуговой 110—180°. Более высокое качество сварных соединений при аргоно-дуговой сварке сплавами МНЖ5-1 объясняется тем, что в этом случае в металле шва содержание железа не превышает 8—10%, а при ручной сварке достигает 50—55%.

Указанные способы обеспечивают также достаточно высокую усталостную прочность сварных соединений. Так, при базе испытаний $2 \cdot 10^6$ циклов предел усталости соединений достигает 2,5—3 *кГ/мм*^{2}; при наплавке бронзой АМц 9-2 на сталь Ст. 3 и СХЛ-4 предел усталости стального образца не снижается.

Другие способы сварки меди и ее сплавов со сталью не имеют такого же практического значения, как указанные выше, однако следует указать на наиболее перспективные из них. Разработан способ электрошлаковой наплавки на сталь, при котором сталь не проплавляется и переход железа в наплавленный металл не превышает 0,1—0,3% [10]. При наплавке бронзы на сталь по методу трения [18] хорошее соединение достигается в том случае, если в месте его бронза доводится до расплавленного состояния. Микротвердость переходного слоя достигает 300 *кГ/мм*^{2}. Сварка по методу трения дала хорошие результаты для двухслойных труб из стали Х14Н18В2БР и меди М3 размерами 32 × 10 *мм* с медью М3 [22]. Был получен предел прочности при растяжении 23 *кГ/мм*^{2}, угол загиба 180°, при микротвердости прослойки около 390 *кГ/мм*^{2}.

При диффузионной сварке меди со сталью рекомендуется температура нагрева 850° С, удельное давление 0,5 *кГ/мм*^{2}, вакуум $5 \cdot 10^{-4}$ *мм рт. ст.*

Медь и ее сплавы со сталью хорошо свариваются методом сварки взрывом. Так, прочность соединения меди М3 со сталью 1Х18Н9Т составила 16,8 *кГ/мм*^{2} при отсутствии резкого повышения микротвердости в зоне соединения.

Сварка алюминия и его сплавов с медью [11, 12, 21]

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 *мк*, которое наносится гальваническим методом. Технология сварки алюминия с медью производится по такой же схеме, как и сварка алюминия со сталью, т. е. дуга смещается 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 *мк*, а со стороны алюминия — полоска твердого раствора меди в алюминии такого же размера. Микротвердость прослойки интерметаллидов, примыкающих к меди, достигает 450—550 *кГ/мм*². Наличие этой зоны обуславливает относительно низкую прочность соединения; только в том случае, если толщина интерметаллидной прослойки меньше 1 *мм*, она не влияет на прочность соединения.

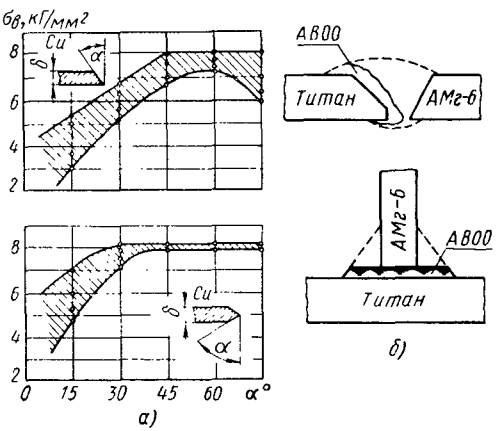


Рис. 19. Сварка алюминия с медью и титаном: *а* — зависимость $\sigma_в$ от угла разделки кромки медного листа [11, 12] при V-образной и X-образной разделке кромок; *б* — подготовка кромок титана для сварки его с алюминиевым сплавом [38]

Прочность соединения повышается при легировании металла шва кремнием (4—5%) и цинком (6—8%), которые подавляют рост интерметаллидной прослойки. Для обеспечения стабильной прочности сварных соединений по свариваемой кромке меди нужно делать скос под углом 45—60° (рис. 19, *а*).

Разработан также способ автоматической сварки по слою флюса алюминия А5 с медью М1 при толщине металла 8, 10, 12 и 20 *мм*; проволока марки АД1 диаметром 2,5 *мм*, флюс АН-А1 с толщиной слоя 12—14 *мм*. Электрод необходимо смещать от скоса на 5—7 *мм* в сторону меди, сварка ведется с дополнительной подачей присадочной проволоки.

В табл. 10 приведены рекомендуемые режимы автоматической сварки по слою флюса и аргоно-дуговой сварки. При обоих способах предел прочности при растяжении равен прочности алюминия (7—10 *кГ/мм*²), удельное сопротивление шва несколько выше ($\rho = 0{,}037$ *ом·мм²/м*), чем у алюминия (0,0313 *ом·мм²/м*). Прочность соединений не изменяется при длительном нагреве до 150° С. При более высоком нагреве она падает в связи с резким увеличением слоя хрупких интерметаллидов. Усталостные испытания сварных соединений толщиной 6 *мм* из меди М1 и алюминия А5, выполненных аргоно-дуговой сваркой, при действии знакопеременного изгиба ($R = -1{,}0$) показали, что усталостная прочность их одинакова с усталостной прочностью сварных соединений из алюминия во всем диапазоне ($N = 10^3 \div 10^6$ циклов) испытаний.

Алюминий с медью свариваются также и методами сварки давлением. Холодная сварка осуществляется при удельных давлениях 150—200 *кГ/мм*² при сварке встык и 8—10 *кГ/мм*² при армировании алюминиевых шин медными на-

кладками. Диффузионные процессы по плоскости контакта при этом способе не наблюдаются.

10. Рекомендуемые режимы сварки алюминия с медью

Способ сварки	Толщина металла в мм	Сварочный ток в *а*	Напряжение дуги в *в*	Скорость сварки в *м/ч*	Смещение электрода от стыка на медь в *мм*	Диаметр в *мм*		Расход аргона в *л/мин*	Число слоев
						электрода	присадочной проволоки		
Аргоно-дуговая неплавящимся электродом	3 6 8	160—180 270—290 320—330	14—15 15—16 16—18	10—12 7—8 6—7	1,5—2 3—4 4—5	4 5 6	2—2 2,5 3	7—8 8—10 10—12	1 2 2
Автоматическая по слою флюса АН-А1	10 12	380—400 390—410	38—40 39—42	21,5 21,5	5—6 6—7	2,5 2,5	3 3	— —	1 1

Сварка стержней диаметром 20 *мм* из алюминия АД1 и меди М1 трением производится при давлении (при нагреве) 3 и 20 *кГ/мм*^{2} (ковочное). Сварное соединение имеет микротвердость в прослойке до 116 *кГ/мм*^{2} (нагрузка 100 *кГ*), угол загиба 180°.

Освоена и широко применяется контактная сварка алюминия с медью сопротивлением и оплавлением [1]. Для уменьшения возможности образования хрупких интерметаллидов в этом случае рекомендуется 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 шва. Прочность соединения при контактной сварке оплавлением 6—7 *кГ/мм*^{2}, угол загиба 180°.

Диффузионная сварка в вакууме алюминия с медью осуществляется при температуре 450—520° С, давлении 0,5—1 *кГ/мм*^{2} при вакууме 10^{-6} *мм рт.ст* [17].

Сварка титана со сталью и сплавами цветных металлов [13, 14]

Сварка титана со сталью [13, 14]. Одной из основных задач при сварке титана со сталями является выбор таких присадочных материалов, методов и режимов сварки, при которых предотвращалось или резко подавлялось образование хрупких интерметаллических фаз TiFe и $TiFe_2$. Непосредственная сварка титана со сталью не дает положительных результатов. Практически применяется сварка через промежуточные вставки. Единственный металл, хорошо соединяющийся с титаном и сталью без образования интерметаллических фаз — ванадий [14]. Однако попытки его использования в качестве промежуточной вставки не дали положительного результата из-за того, что выпускаемый промышленностью ванадий загрязнен примесями, в связи с чем прочность и пластичность соединения оказались неудовлетворительными.

Хорошие результаты были получены при использовании комбинированной вставки, состоящей из технического тантала ($\sigma_в$ = 70 *кГ/мм*^{2}) и термически обработанной бронзы Бр. Б2.

При аргоно-дуговой 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).

Прочность соединения по бронзе $\sigma_в = 49$ *кГ/мм²*, при закалке бронзы до сварки $\sigma_в = 60{,}5$ *кГ/мм²*.

При комбинированной вставке из бронзы Бр.Б2 и ниобия, для титана ОТ4-1 и стали ЭИ894 толщиной 0,8 и 2 *мм* аргоно-дуговая сварка производилась в камере с контролируемой атмосферой на режиме [13]:

а) при толщине 0,8 *мм*: $I = 55 \div 65$ *а*; $U_д = 8 \div 9$ *в*; $v_{св} = 18 \div 20$ *м/ч*;

б) при толщине 2 *мм*: $I = 160 \div 170$ *а*; $U_д = 18 \div 20$ *в*; $v_{св} = 18 \div 20$ *м/ч*.

При толщине 0,8 *мм* соединение имело $\sigma_в = 53 \div 66$ *кГ/мм²*; $\varphi = 72 \div 180°$; при толщине 2 *мм* $\sigma_в = 40 \div 45$ *кГ/мм²*; $\varphi = 41 \div 61$.

Возможна также контактная сварка с применением прокладки из биметалла, состоящего из ниобия и молибдена.

При диффузионной сварке титана со сталью соединение получается также хрупким в связи с выделением интерметаллидов. Применение комбинированной прослойки из ниобия и бронзы Бр. Б2 дает удовлетворительное соединение. Удовлетворительные результаты при диффузионной сварке титана и стали 1Х18Н9Т получаются также при использовании прослойки из ванадия.

Применение комбинированной вставки из ниобия и бронзы Бр.Б2 позволяет сваривать титан со сталью 1Х18Н9Т толщиной 0,8 *мм* электронолучевым методом.

Сварка титана с алюминием [38]. При аргоно-дуговой сварке титанового сплава ОТ4 с алюминиевыми сплавами АМг6 рекомендуется очистка кромок титана от α-слоя и загрязнений и алитирование в чистом алюминии при температуре 800—830° С с выдержкой 1—3 *мин*. В этом случае период образования соединения между алюминием и титаном меньше, чем период ретардации (рис. 13), и хрупкие интерметаллиды по линии соединения не успевают образоваться. Кромки предварительно разделывают согласно рис. 19, *б*. До сварки на алитированные кромки наплавляют слой чистого алюминия (5—8 *мм*) на режиме (при толщине титана более 8 *мм*); $I = 170 \div 180$ *а*; $U_д = 18 \div 20$ *в*; проволока марки АВ00 диаметром 5—8 *мм*; расход аргона 16—18 *л/мин*. Последующая сварка производится так же, как и алюминиевого сплава.

Предел прочности сварного соединения при растяжении сплавов ОТ4 + + АМг6 зависит от толщины слоя алюминия и равен 11—27 *кГ/мм²*, угол загиба 17—30°. При усталостных испытаниях (цикл $R = 0$) соединения ОТ4 + + АМг6 выдержали до разрушения 50—80 тыс. циклов (основной металл АМг6 — 168 тыс. циклов).

Возможна успешная сварка трением стержней диаметром 20 *мм* из титанового сплава ВТ5 с алюминиевыми сплавами АД1, АМц и АМг [40] Предел прочности при растяжении для соединений соответственно равен 13 и 20 *кГ/мм²*, угол загиба 180°.

Сварка титана с медью и ее сплавами [23] Сварка титана с медью затруднена большим различием свойств и образованием хрупких интерметаллидов (табл. 9). Наиболее успешно сварка плавлением осуществляется при использовании промежуточных вставок из специально выплавленных сплавов титана, легированного Mo, Nb или Ta, которые понижают температуру превращения $\alpha \rightarrow \beta$ 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 ВТ15 (3,5% 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 *кГ/мм²* и угол загиба 140—180°, а при сварке с бронзой Бр.Х0,8 соответственно 26—28 *кГ/мм²* и 100—160° В прослойке по линии соединения микротвердость достигает 470—480 *кГ/мм²* при твердости бронзы Бр. Х0,8— 120 *кГ/мм²*.

Возможна холодная сварка титана с медью по методу «вдавливания», указанная в работах К. К. Хренова[1].

---

[1] «Автоматическая сварка», 1965, № 3, стр. 21 и 22.

При диффузионной сварке титана с медью требуется применение промежуточных прослоек. Диффузионная сварка встык стержней диаметром 15 *мм* из титановых сплавов ОТ4 и ВТ14 с медью М1 и бронзой Бр.Х0,8 [13] производится с применением прослоек из молибдена или ниобия толщиной 0,1—0,2 *мм*. Прослойка напыляется на титан, а образец предварительно отжигается в вакуумной камере при 140° С в течение 3 *ч* при вакууме 10^{-3}—10^{-4} *мм рт.ст.* Режимы диффузионной сварки: температура 980° С, давление 0,35 *кГ/мм*², выдержка 300 *мин*. Прочность соединения 19—27 *кГ/мм*². Хорошие результаты получаются, если свариваемые поверхности полированы.

Обработка поверхностей под сварку точением, травлением и притиранием снижает прочность соединения.

Сварка ниобия, тантала и молибдена со сталью и сплавами цветных металлов [15, 35]

Принципиальная возможность сварки ниобия, тантала и молибдена со сталями и цветными сплавами была частично показана в предыдущем параграфе.

Тантал и ниобий по свойствам близки к титану и при сварке с ним образуют твердые растворы без хрупких соединений. Ниобий также удовлетворительно сваривается с медью и медными сплавами, с которыми образует ограниченные растворы. Тантал с медью растворов и соединений не образует [23]. Однако обычно в качестве вставок применяют бериллиевую бронзу Бр.Б2, так как путем ее закалки (перед сваркой) прочность соединения удается повысить до 60 *кГ/мм*² [13, 14].

Проверена на практике электронолучевая сварка меди М1 толщиной 1,5 *мм* с молибденом ВМ-2 и танталом толщиной 0,5 *мм* встык. Одним из вариантов сварки является случай, когда на молибденовые стержни диаметром 14 *мм* надевают медные втулки с толщиной стенки 1,5 *мм*, а сварку производят по их кромке внахлестку.

Предел прочности при растяжении соединения меди с молибденом составляет 49 *кГ мм*², угол загиба 45°, микротвердость по месту соединения плавно понижается с 286 (микротвердость молибдена) до 80 *кГ/мм*² (микротвердость меди). Соединение меди с танталом имело при разрыве предел прочности 15 *кГ/мм*² и угол загиба 90°. В обоих случаях соединения вакуумно-плотные.

При электронолучевой 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. Защищенные детали рекомендуется перед сваркой подвергать предварительной дегазации в вакууме путем нагрева до 800—1000° С с выдержкой в течение 5 *мин*. По данным работы [35], при электронолучевой сварке ниобиевой проволоки диаметром 1 *мм* с молибденовыми стержнями диаметром 12 *мм* в стержнях сверлились отверстия диаметром 1 *мм*, глубиной 6 *мм*, в которые ниобиевые проволочки вставлялись плотно без зазоров. Сварка осуществлялась оплавлением поверхности молибдена на глубину 2—2,5 *мм*. Режим сварки: $U_{уск}$ = 50 *кв*; луч с пятном 0,8 *мм*, ток 30 *ма*, вакуум 10^{-4} *мм рт.ст.* При испытании на вырывание проволоки разрушалась ниобиевая проволока. Микротвердость на границе сплавления в 2 раза выше, чем микротвердость ниобия, и в 1,5 раза выше микротвердости молибдена.

Применение биметалла для получения сварных соединений

Биметаллические заготовки из углеродистой и нержавеющей стали с алюминиевыми сплавами, из стали и медноникелевого сплава МНЖ5-1, из стали 1Х18Н9Т и титанового сплава ОТ4, ОТ4-1 применяются для сварки разнородных металлов [13, 28]

При использовании биметалла из стали Ст.3С, и СХЛ-4 и алюминиевых сплавов АМг3 и АМг6 соотношение толщины 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 *кГ/мм*² и на отрыв 10—15 *кГ/мм*².

На рис. 20 показаны рекомендуемые варианты различных соединений с применением биметалла. Прочность сварного соединения сильно зависит от прочности сцепления слоев биметалла и, следовательно, от площади биметаллической вставки (рис. 20, *б*). Недостатком таких соединений является неконструктивность узлов соединения и отсутствие средств контроля качества сцепления

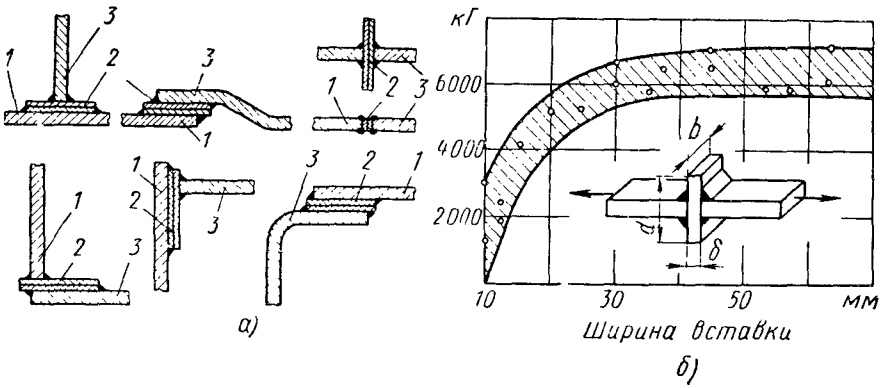


Рис. 20. Сварка алюминия со сталью с помощью биметаллических вставок: *а* — варианты соединения стали с алюминиевым сплавом с помощью биметаллических вставок: *1* — сталь; *2* — биметалл; *3* — алюминиевый сплав [28]; *б* — зависимость прочности сварного соединения от площади биметаллической вставки (Ст. 3С + АМг-6; *d* = 70 *мм*; δ = 10 ÷ 12 *мм*)

слоев биметалла. Это часто приводит к тому, что соединения этого типа не обладают вакуумной плотностью.

Для предотвращения появления хрупких интерметаллидов внутри биметалла при нагреве в процессе сварки необходимо строго выдержать рекомендуемый режим сварки. Для биметалла толщиной 10—12 *мм* рекомендуется следующий режим сварки:

со стороны алюминиевого сплава аргоно дуговая сварка: $I = 140 \div 160$ *а*; $U_д = 14 \div 18$ *в*; $v_{св} = 6 \div 7$ *м/ч*;

со стороны стали сварка в CO_2: $I = 100 \div 130$ *а*; $U_д = 18 \div 20$ *в*; $v_{св} = 17 \div 20$ *м/ч*.

Наиболее вероятно образование хрупких интерметаллидов в биметалле Ст.3С, 1Х18Н9Т и сплава АМг6 при нагреве линии соединения выше 450° С. При нагреве до 550° С и выше биметалл расслаивается. Рекомендуется сварку начинать со стороны алюминия и после охлаждения всего узла со стороны стали.

Возможно также применение биметаллических вставок из титанового сплава ОТ4-1 и стали 1Х18Н9Т, получаемых прокаткой при температуре 800° С. Суммарная толщина биметалла 1,5 *мм*, толщина такого сплава 0,9 *мм*. Так прочность указанного биметалла на срез равна 1 *кГ/мм*², прочность соединения зависит от размеров вставки. Вставки из биметалла использовались для точечной и аргоно-дуговой сварки титана и стали толщиной 0,8 *мм*.

Известно также применение биметалла из стали и медноникелевой бронзы МНЖ5-1.

ЛИТЕРАТУРА

Сварка разнородных сталей

1. Брук Б. И. Радиоактивные изотопы в металлургии и металловедении сварки Л., Судпромгиз, 1959.
2. Гельман А. С. и Котов В. С. Исследование стыковой сварки оплавлением труб из аустенитной стали с трубами из перлитной стали. ЦНИИТМАШ. Кн. 76. М., Машгиз, 1956.
3. Готальский Ю. Н., Снисарь В. В. Электроды АНЖР-1 для сварки разнородных сталей. «Автоматическая сварка», 1968, № 9.
4. Ерохин А. А. и Сидлин З. А. Расчет разбавления аустенитных наплавок основным металлом при разбавлении электродов. «Сварочное производство», 1968, № 6.
5. Заруба И. И. Сварка в углекислом газе. Киев, Машгиз, 1960.
6. Земзин В. Н. Сварные соединения разнородных сталей. М. — Л., «Машиностроение», 1966.
7. Земзин В. Н. и Френкель Л. Д. Сварные конструкции паровых и газовых турбин. М., Машгиз, 1962.
8. Земзин В. Н. Зоны сплавления сварных соединений разнородных сталей. «Котлотурбиностроение», 1950, № 6.
9. Земзин В. Н. и Розенблюм В. И. Остаточные напряжения в сварных разнородных дисках из аустенитной стали с перлитной. «Энергомашиностроение», 1956, № 11.
10. Игнатов В. А., Земзин В. Н. и Петров Г. Л. Влияние никеля в аустенитных швах на миграцию углерода в сварных соединениях разнородных сталей. «Автоматическая сварка», 1967, № 8.
11. Кузмак Е. М., Кармазинов Н. Н. и Кошелев Н. А. Исследование сварных соединений нефтеаппаратуры из специальных сталей с помощью радиоактивных изотопов. «Межвузовская конференция по сварке». Сборник докладов. М., Машгиз, 1958.
12. Лившиц Л. С. и Бахрах Л. Н. Вопросы сварки сталей разнородных структурных классов. «Сварочное производство», 1962, № 11.
13. Любавский К. В. Металлургия сварки стали плавлением. Справочник по сварке. Т. I, гл. III. М., Машгиз.
14. Медовар Б. М. и др. Новые способы изготовления переходных элементов для сварки разнородных сталей. «Автоматическая сварка», 1967, № 10.
15. Петров Г. Л. Неоднородность металла сварных соединений. М., Судпромгиз, 1962.
16. Рымкевич А. М. и Гельман А. С. Электрошлаковая сварка соединений разнородных сталей. Сб. «Технология сварочного производства». Под ред. Б. А. Работнова. М., «Машиностроение», 1964, (ЛМЗ им. XXII съезда КПСС).
17. Технология электрической сварки плавлением. Под ред. Б. Е. Патона. М., Машгиз, 1962.

Сварка разнородных сплавов

1. Андреев В. В., Евстафьев В. Г., Федоров Л. Е. Контактная сварка меди с алюминием. «Автоматическая сварка», 1965, № 6.
2. Бельчук Г. А., Глускин Д. Я, Федоров И. И. К вопросу о сварке алюминия и его сплавов со сталью. Труды ЛКИ. Вып. XXIX. Л., 1959.
3. Бельчук Г. А. Исследование некоторых особенностей технологии аргонодуговой сварки алюминия и его сплавов со сталью. «Сварочное производство», 1961, № 5.
4. Бельчук Г. А. Дуговая сварка алюминия и его сплавов со сталью при нанесении слоя алюминия на сталь нагревом высокой частоты. Труды ЛКИ. Вып. XXXVI, 1962.
5. Бельчук Г. А. и др. Коррозионная стойкость сварных соединений из алюминиевых сплавов и стали. «Автоматическая сварка», 1962, № 7.
6. Бельчук Г. А. Динамическая прочность сварных соединений стали с алюминиевыми сплавами. «Сварочное производство», 1963, № 11.
7. Бельчук Г. А., Рябов В. Р., Юматова В. И. Современное состояние технологии аргоно-дуговой сварки алюминия и его сплавов со сталью. Изд. ЛДНТП, 1967.
8. Бобров Г. В. и др. Диффузионная сварка титановых сплавов с медными. «Автоматическая сварка», 1967, № 4.
9. Вайнерман А. Е. Плазменная наплавка меди и ее сплавов на сталь. Изд. ЛДНТП, 1966.
10. Волошкевич Г. З., Лычко И. И. Электрошлаковая наплавка меди и ее сплавов на сталь. «Автоматическая сварка», 1966, № 9.
11. Воропай Н. М. Особенности технологии автоматической сварки по флюсу алюминия с медью. «Автоматическая сварка», 1967, № 2.
12. Воропай Н. М., Аснис А. Е. Влияние интерметаллической прослойки на статическую и усталостную прочность медеалюминиевых соединений. «Автоматическая сварка», 1967, № 9.
13. Горен И. Г. О сварке титановых сплавов со сплавами на никелевой основе. «Сварочное производство», 1964, № 12.
14. Гуревич С. М., Замков В. Н. Сварка титана со сталью. «Автоматическая сварка», 1962, № 8.

15. Дьяченко В. В., Сивов Е. Н., Морозов Б. Н. Сварка молибдена и ниобия с нержавеющей сталью. «Сварочное производство», 1966, № 1.
16. Илюшенко В. М., Босак Л. К., Гришин Л. Н. Автоматическая сварка под флюсом меди со сталью больших толщин. «Автоматическая сварка», 1966, № 6.
17. Казаков Н. Ф. Диффузионная сварка в вакууме. «Машиностроение», 1968.
18. Кершенбаум Я. М., Авербух В. А., Людмирская И. Г. Исследование процесса наплавки трением бронзы на сталь. «Автоматическая сварка», 1967, № 6.
19. Красулин Ю. Л., Вайперман А. Е., Шоршоров М. Х. Наплавка сплавов меди на сталь сжатой струей с токоведущей присадочной проволокой. «Сварочное производство», 1967, № 6.
20. Лобанов Ю. Н. Точечная сварка алюминия с алитированной сталью. «Сварочное производство», 1967, № 2.
21. Лозовская Л. В. Особенности структуры шва при сварке плавлением алюминия с медью. «Автоматическая сварка», 1967, № 9.
22. Медриш И. Н., Лужанский И. Б. Сварка трением стали ЭИ695Р с медью М3. «Сварочное производство», 1967, № 10.
23. Михайлов А. С. и др. Сварка титановых сплавов с медью и ее сплавами. «Сварочное производство», 1965, № 8.
24. Пешехонов В. Д., Коболенский Н. Ф. и Дубицкий А. К. Сварка тонколистовых соединений меди со сталью Х18Н10Т. «Сварочное производство», 1966, № 1.
25. Исарас Г. Г., Михайлов И. С. Автоматическая наплавка безоловянистых бронз на стали под керамическими флюсами. «Сварочное производство», 1966, № 11.
26. Рабкин Д. М., Рябов В. Я. К вопросу о сварке плавлением углеродистой стали с алюминиево-магниевыми сплавами. «Автоматическая сварка», 1962, № 7.
27. Рабкин Д. М. и др. О распределении элементов в зоне сплавления при сварке алюминия со сталью. «Автоматическая сварка», 1966, № 1.
28. Раздуй Ф. И., Засуха П. Ф., Рябов В. Р. Сварка сталеалюминиевых конструкций с помощью биметаллических вставок. «Сварочное производство», 1966, № 1.
29. Рябов В. Р., Юматова В. И. Механические свойства сталеалюминиевых сварных соединений. «Сварочное производство», 1966, № 1.
30. Рябов В. Р., Юматова В. И. Влияние химического состава присадочных проволок на прочность сталеалюминиевых соединений. «Автоматическая сварка», 1966, № 12.
31. Рыкалин Н. Н., Шоршоров М. Х., Красулин Ю. Л. Физические и химические проблемы соединения разнородных материалов. Изд. АН СССР, «Неорганические материалы». Т. 1, № 1, 1965.
32. Седых В. С. и др. Сварка взрывом. «Сварочное производство», 1962, № 5.
33. Стрижевская Л. Г., Старева Л. Л. Сварка плавлением некоторых разнородных металлов. «Сварочное производство», 1966, № 1
34. Сыроваткин А. А. Некоторые особенности сварки стали с медью. «Автоматическая сварка», 1964, № 4.
35. Теребихин Г. В. Электронолучевая сварка меди с молибденом, танталом и сталью Х18Н10Т. «Сварочное производство», 1967, № 10.
36. Тимофеев В. Н., Исаев Н. И. Наплавка сплавов меди на стальные поверхности. «Автоматическая сварка», 1965, № 4.
37. Трутнев В. В. и Шоршоров М. Х. Диффузионная сварка аустенитной стали с алюминием и его сплавами. «Сварочное производство», 1967, № 10.
38. Фридляид Л. А., Зиновьева Т. Н., Конов Ю. Х. Сварка алюминия с титаном. «Сварочное производство», 1963, № 11.
39. Штернин Л. А., Прокофьев С. Н. Сварка трением алюминия со сталью и медью. «Сварочное производство», 1966, № 11.
40. Штернин Л. А. Сварка трением разнородных металлов. «Автоматическая сварка», 1965, № 3.
41. Механические свойства металлических соединений. Сб. переводов. М., Металлургиздат, 1962.
42. Andrews D. R. «Welding Mild Steel to Aluminium and its Alloys», Welding and Metall Fabrication, 1961, № 11.
43. Holler H. und Maier A. Zum Untersuchung von Autogenschweiß und des Aluminium mit den anderen Metallen, Autogene Metallbearbeit, 1935, № 12.
44. Keel C. F. Nenes Verfahhrem zum verschweißen von Aluminium mit Eisen, Kupfer und anderen Metallen, Zeitschrift für Schweißtechnik, 1938, № 9
45. Miller M. A. and Mason E. Properties of Ars-Welded joints between, en aluminium and Stainless Steel», Welding Journal, 1956, № 7.

ГЛАВА IX

НАПЛАВКА ИЗНОСОСТОЙКИХ И ДРУГИХ СПЕЦИАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Наплавка служит для увеличения размеров, а также для создания слоя, обладающего нужными свойствами. Она широко применяется в ремонтном деле с целью восстановления изношенных и поврежденных деталей. Весьма эффективно использование наплавки для изготовления из конструкционной (относительно дешевой) стали биметаллических деталей, на рабочие поверхности которых наплавляется износостойкий, или жаростойкий, или иной специальный сплав. Вес наплавленного металла обычно не превышает нескольких процентов от общего веса изделия. Наплавка может быть осуществлена многими способами. Наиболее часто используются различные виды электродуговой сварки.

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ НАПЛАВКИ

Современные способы наплавки

Ручная дуговая наплавка штучными электродами. Благодаря простоте, применимости для деталей любой формы и многим другим преимуществам наплавка покрытыми электродами является наиболее распространенным способом. Обычно используют электроды диаметром 3—6 *мм*, что зависит от размеров наплавляемых деталей и требуемой толщины слоя: при толщине слоя менее 1,5 *мм* применяют электроды диаметром 3 *мм*, при толщине слоя свыше 6 *мм* и крупных изделиях — 6 *мм*. Для наплавки в нижнем положении обычно применяют следующие величины тока:

Диаметр стержня электрода в *мм*	3	4	5	6
Ток в *а*	80—110	100—160	140—220	180—300

Чтобы меньше расплавлять основной металл, наплавку следует вести короткой дугой на минимальном токе. Кратеры нужно тщательно заваривать. Производительность ручной наплавки составляет 0,3—2,0 *кг/ч*. С целью повышения производительности иногда применяют наплавку пучком электродов, а также трехфазной дугой (см. т. 2, стр. 195). Эти приемы пригодны только в нижнем положении; они повышают производительность по сравнению с наплавкой одним электродом, но обычно для тех же объектов более целесообразно использование механизированной наплавки.

Главные недостатки ручной наплавки — низкая производительность, тяжелые условия труда, необходимость специальной вентиляции рабочего места и защиты от излучения дуги, непостоянство качества наплавленного слоя.

Наплавка под флюсом. При наплавке под флюсом необходимо учитывать довольно большой объем ванночки жидкого флюса и металла. Во избежание стекания и образования дефектов наплавляемый участок должен быть расположен горизонтально или под небольшим углом к горизонтальной поверхности.

При наплавке под флюсом отдельного валика на горизонтальную поверхность на обычных режимах доля основного металла составляет около $^2/_3$, наплавленного $^1/_3$. Чаще всего разбавление уменьшают сокращением шага наплавки m (рис. 1). С той же целью ограничивают сварочный ток.

При наплавке крупных деталей наиболее целесообразно повышение производительности за счет многодуговой наплавки — один наплавщик управляет одновременно несколькими аппаратами, каждый из которых наплавляет определенный участок изделия.

Более простое оборудование требуется для многоэлектродной наплавки, при которой одновременно плавятся несколько проволок, подключенных к одному полюсу источника тока и расположенных поперек оси наплавленного валика. Под флюсом создается общая сварочная ванна; электроды плавятся поочередно. Благодаря уменьшению затрат тепла на плавление флюса коэффициент наплавки возрастает на 20—40%, а доля основного металла снижается до 0,2—0,3 [13].

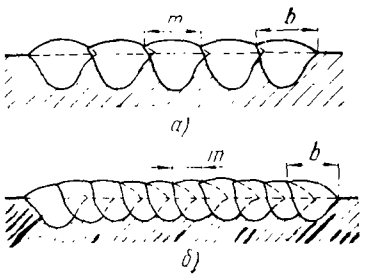


Рис. 1. Влияние шага наплавки на долю основного металла в составе наплавленного слоя: $а$ — $m = 0{,}9\ b$; $\gamma_0 = 0{,}65$; $б$ — $m = 0{,}4\ b$, $\gamma_0 = 0{,}45$

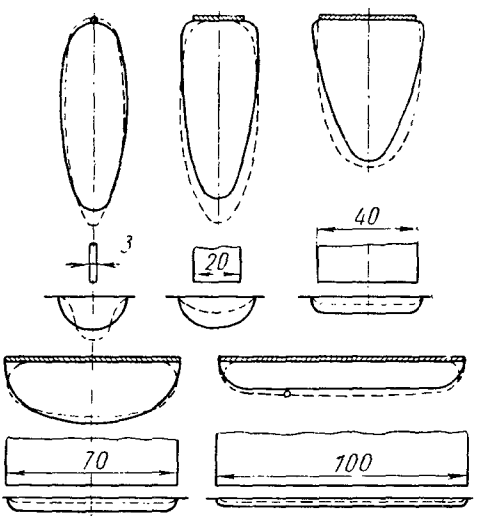


Рис. 2. Форма ванны жидкого металла (в плане и максимальном поперечном сечении) при наплавке проволокой и лентой различной ширины на одинаковом режиме: ток 720 $а$, напряжение 32 $в$, скорость сварки 12 $м/ч$

Еще проще оборудование наплавочной установки, когда в качестве электрода используется лента малой толщины и большой ширины. Дуга, перебегая от одного края ленты к другому, равномерно оплавляет ее торец. Коэффициент наплавки при этом получается выше, чем при использовании проволоки, а глубина проплавления и доля основного металла тем ниже, чем больше ширина ленты (рис. 2).

В некоторых случаях целесообразно использовать в качестве электрода проволоку большого диаметра и вести наплавку с поперечными колебаниями электрода. Форма ванны получается при этом идентичная получаемой при наплавке электродной лентой, а электродный материал оказывается более дешевым и доступным, чем холоднокатаная лента. Преимуществом широкослойной наплавки (с поперечными колебаниями) является возможность использования нагрева вылета электрода и увеличения коэффициента наплавки до 16—18 $г/а \cdot ч$ (см. т. 2, стр. 201), что повышает производительность наплавки [38].

Когда требуется уже в первом слое свести к минимуму участие основного металла в образовании наплавленного валика, положительные результаты дает

наплавка с присадочной проволокой (с подачей добавочного электрода). Наплавочный аппарат движется навстречу добавочному электроду, который подается под углом 25—30° к наплавляемой поверхности и касается ее перед поступлением в дугу. Диаметр добавочного электрода обычно несколько меньше диаметра основного, скорость подачи может изменяться в широких пределах. Производительность наплавки с добавочной проволокой достигает 15—20 *кг/ч* [22, 23].

Вместо проволоки присадкой может служить также крупнозернистый порошок (диаметр частиц 0,4—4,0 *мм*), полученный, например, гранулированием расплава, дроблением хрупкой металлокерамической заготовки или приготовленный иным способом. Для той же цели предложено использование рубленой проволоки (длина отрезков 2—3 *мм*). С помощью специального питателя гранулированную присадку подают на наплавляемую поверхность впереди движущейся дуги, либо заполняют присадкой выемки, подлежащие наплавке. Одновременно применяют повышенную силу тока. Наилучшие результаты достигаются, когда вес присадки составляет 75—80% от веса расплавляемой электродной проволоки. В этом случае коэффициент наплавки составляет 21—25 *г/а·ч*, а производительность наплавки 13—25 *кг/ч* [1, 29].

Описанные приемы наплавки под флюсом эффективны для крупногабаритных изделий. Возможность наплавки деталей малых размеров и тонких слоев существенно увеличивается при использовании вибрирующего электрода. С помощью эксцентрикового механизма заставляют вибрировать мундштук головки, колебания передаются электродной проволоке, и она вибрирует в осевом направлении с частотой 20—60 *гц* и амплитудой 0,5—3 *мм*. Наплавка вибрирующим электродом малого диаметра (0,8—1,2 *мм*) возможна на токе 50—100 *а*; успешно наплавляются по винтовой линии тела вращения диаметром 20—80 *мм* [50]. При наплавке вибрирующим электродом шлицевых валов припуск на обработку по боковой поверхности составляет всего 0,3—0,8 *мм*.

Некоторые данные о параметрах режима наплавки под флюсом приведены на рис. 3—5.

Наплавка токами высокой частоты. Индукционный нагрев т. в. ч. применяется для наплавки с присадочным металлом, который предварительно наносят на поверхность изделия в виде смеси порошков, литого кольца или прессованного брикета, либо расплавляют в огнеупорной воронке, расположенной над наплавляемой деталью.

В массовом производстве освоена наплавка т.в.ч. лемехов, лап культиваторов, решетаков угольных конвейеров и других изделий. Описана наплавка т.в.ч. с использованием в качестве присадочного металла литых колец, применительно к увеличению долговечности выпускных клапанов автомобильных двигателей [58], а также дизелей различного назначения [26].

При высокочастотной наплавке шихта — смесь сормайта с флюсом наносится на наплавляемую поверхность и при помощи специального приспособления вводится в индуктор, где нагревается до температуры плавления сормайта — 1150° С. Флюс плавится, растворяет поверхностные окислы, обеспечивает хорошее смачивание поверхности и растекание износостойкого сплава. Производительность наплавки достигает 10 *кг/ч*. Возможно получение наплавленных слоев толщиной 0,4 *мм* и более [40].

Наплавка с использованием жидкого присадочного металла применяется на автомобильных заводах для толкателей клапанов двигателей внутреннего сгорания: на разогретый торец стержня наплавляют небольшую порцию износостойкого металла. Присадочным материалом служат литые палочки из легированного чугуна, по одной на каждую наплавляемую деталь. Палочки расплавляются в огнеупорном тигле, помещенном в индуктор. Для предохранения металла от окисления в выемку толкателя засыпают щепотку порошка плавленой буры. Торец толкателя нагревается в индукторе до 1150—1200° С. Одновременно происходит плавление палочки чугуна в тигле. На нагретую и офлюсованную поверхность толкателя выливают порцию чугуна, после чего следует дополнительный подогрев, а затем охлаждение водяным душем до 700—750° С. Все эти

операции выполняются на многопозиционном станке-автомате карусельного типа.

Электрошлаковая наплавка. Глубина проплавления основного металла при этом способе наплавки зависит от многих факторов, особенно от равномерности нагрева жидкого шлака. Путем перемещения электрода или изделия (например, вращения цилиндрического изделия) или посредством вращения шлаковой ванны можно достичь более равномерного распределения тепла, чем при неподвижном электроде, и снизить долю основного металла в металле

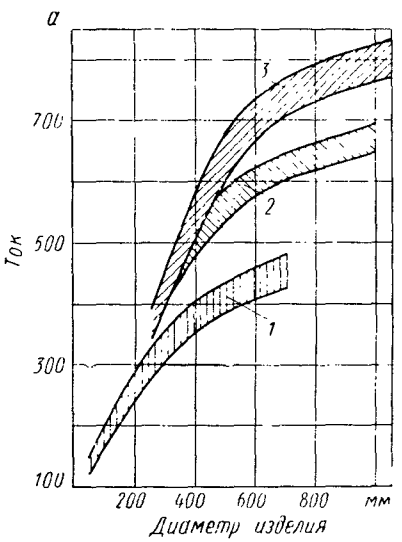


Рис. 3. Оптимальные диапазоны тока при наплавке тел вращения по винтовой линии в зависимости от диаметра изделия: *1* — одним электродом диаметром 3—3,5 *мм*; *2* — одним электродом диаметром 4—5 *мм*; *3* — тремя электродами диаметром 3—3,5 *мм*

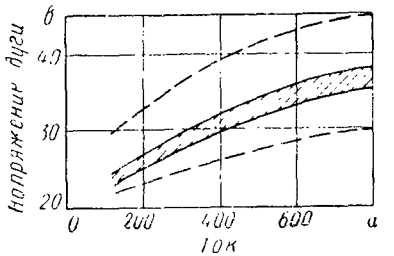


Рис. 4. Оптимальное напряжение дуги в зависимости от силы тока при наплавке под флюсом

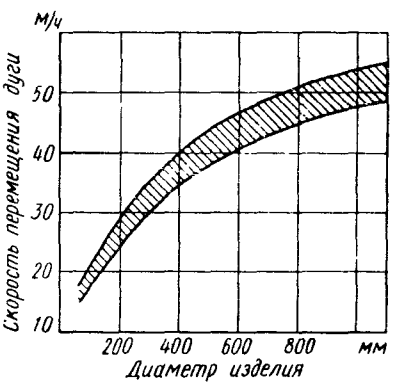


Рис. 5. Оптимальная скорость перемещения дуги при наплавке по винтовой линии в зависимости от диаметра наплавленного изделия

наплавки до 0,1 и менее. Схема электрошлаковой наплавки плоской поверхности изделия в вертикальном положении показана на рис. 6.

Примером торцовой электрошлаковой наплавки может служить наплавка стали марки 3Х2В8 на заготовки керпов для захвата слитков [31] (рис. 7). Электродом служит пруток диаметром 20 *мм*. Аналогичный процесс используется для наплавки изношенных штампов с глубоким отверстием малого диаметра [11]. Для создания шлаковой ванны и вывода усадочной раковины служат медные кокили.

Электрошлаковая наплавка выгодна, когда требуется наплавить большое количество металла, например, при восстановлении изношенных деталей с помощью электрода сложной формы (рис. 8). Обычно при этом используются большие мощности (ток до 4000 *а* при напряжении 28—45 *в*) [48].

Для изготовления деталей с наплавкой на торце иногда используется прием **стыко-шлаковой** наплавки. Процесс начинается наведением шлаковой ванны на

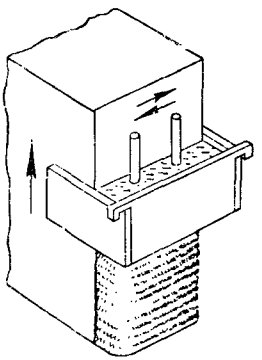


Рис. 6. Схема наплавки плоской поверхности в вертикальном положении с помощью составного ползуна

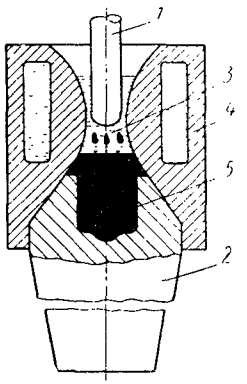


Рис. 7. Схема наплавки верха клещевого крана: *1* — электрод; *2* — заготовка; *3* — шлаковая ванна; *4* — кокиль; *5* — ванна расплавленного металла

дне медной водоохлаждаемой формы (рис. 9), электродом служит хвостовик детали с приваренной пластиной или прутком из легированного металла.

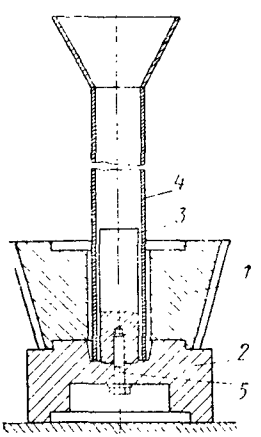


Рис. 8. Схема электрошлаковой наплавки буровой шарошки электродом сложной формы: *1* — шарошка; *2* — подставка; *3* — графитовый стержень; *4* — электрод; *5* — болт

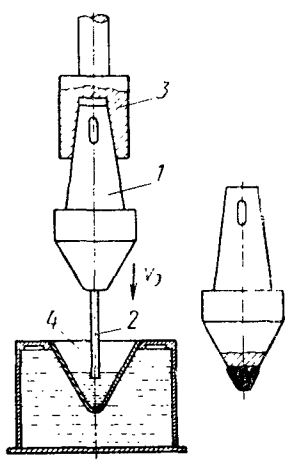


Рис. 9. Схема процесса стыко-шлаковой наплавки: *1* — изделие; *2* — легированный электрод; *3* — держатель; *4* — медный кокиль. Справа — наплавленное изделие

Сначала расплавляется легированная часть электрода. В момент погружения хвостовика в шлак скорость подачи сперва уменьшают (для прогрева и оплавления

торца детали), а затем резко увеличивают до погружения детали в металлическую ванну. Происходит сварка хвостовика и отливки, полученной при расплавлении легированной части электрода. Таким путем весьма эффективно изготовляют, например, зубья ковшей экскаваторов [49].

Электрошлаковая наплавка несколькими электродными проволоками, расположенными по контуру наплавляемой поверхности, позволяет получить высокую производительность. Например, для наплавки цилиндрических валков диаметром 200—300 *мм* при длине бочки до 400 *мм* применяется девятиэлектродная установка. Описана электрошлаковая наплавка по аналогичной технологии валков пилигримовых трубопрокатных станов [57].

Более простое оборудование может быть использовано при наплавке электродом-трубой. Такой процесс весьма эффективен, например, для изготовления биметаллических валков: со стальным телом и рабочим слоем из износостойкого чугуна. Валки диаметром 340 *мм* с длиной бочки 450 *мм* наплавляют чугунной трубой с толщиной стенки 12 *мм* в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе. Время наплавки слоя толщиной 30 *мм* около 1 *ч* [16].

Преимущества электрошлаковой наплавки: очень высокая производительность, надежность процесса, малая склонность к порам и трещинам, возможность получения чистой и гладкой поверхности с малыми припусками для обработки. Недостаток: затруднительно получение наплавленного слоя толщиной менее 20 *мм*, так как при малом объеме расплавленного шлака он легко перегревается и закипает, что нарушает электрошлаковый процесс.

Дуговая наплавка неплавящимся электродом. Ручная наплавка смесями типа сталинита, КБХ и др., а также зернистым твердым сплавом рэлит производится с помощью угольных или графитовых электродов (см. т. 2, стр. 189). Наплавочную смесь (часто с добавлением 2—5% плавленой буры) насыпают слоем, толщина которого должна быть в 2—3 раза больше желательной толщины наплавленного слоя. Смесь расплавляют угольным или графитовым электродом диаметром 8—20 *мм*. Рекомендуемые режимы наплавки указаны в табл. 1 [8].

1. Режимы наплавки угольными или графитовыми электродами

Наплавочная смесь	Толщина детали в *мм*	Сварочный ток в *а*		Диаметр электрода	Длина дуги
		постоянный, прямой полярности	переменный	в *мм*	
Сталинит, сталинит улучшенный, ВИСХОМ-9 и т. п.	3—5 6—15 Более 15	80—100 120—140 160—180	90—120 140—160 180—230	8—10 10—12 16—20	4—8
Карбид вольфрама (рэлит, вокар)	Менее 10 Более 10	140—160 160—200	160—180 180—240	8—10 12—18	3—5
Боридные смеси (КБХ, БХ)	Менее 10 Более 10	160—190 170—210	190—210 220—250	10—12 12—18	4—6

За один проход рекомендуется наплавлять слой не толще 2 *мм* и не шире 50 *мм*. Наплавку ведут «от себя», наклоняя электрод, как показано на рис. 10. Ввиду хрупкости и опасности отколов общая толщина слоя, наплавленного этим способом, не должна превышать 6 *мм*. Отсутствие защиты расплавленного металла от воздуха приводит к частичному окислению легирующих примесей, к образованию пор, неметаллических включений и других дефектов.

Более совершенна наплавка вольфрамовым электродом в аргоне. При этом способе используются горелки для сварки непла-

вящимся электродом (см. т. 2, стр. 385) и литые присадочные прутки, обычно, из сплавов на основе никеля или кобальта. Можно получить очень малую глубину проплавления и наплавлять тонкие слои до 0,5 *мм* [47].

Крупными технологическими преимуществами обладает наплавка **плазменной дугой** (см. т. 2, стр. 616). Небольшие изменения длины плазменной дуги не отражаются на процессе наплавки. Минимальное проплавление основного металла может быть обеспечено при хорошем формировании наплавленного валика.

Присадочный металл можно подавать в дугу в виде проволоки или порошка. Возможно также расплавление плазменной дугой присадочных колец (литых, металлокерамических или проволочных), предварительно уложенных на наплавляемую поверхность. Так, например, при плазменной наплавке выпускных клапанов автомобилей присадочные кольца специальной формы расплавляют в струе аргона (рис. 11) [15]. Наплавка плоских поверхностей осуществляется обычно плазменной дугой прямого действия. Присадочный порошок подается в зону дуги впереди горелки либо в хвостовую часть ванны.

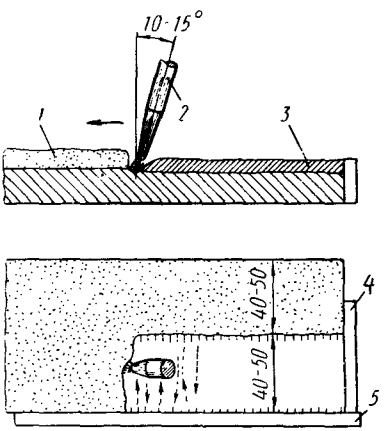


Рис. 10. Дуговая наплавка угольным электродом: *1* — наплавочная смесь; *2* — электрод; *3* — наплавленный слой; *4* и *5* — медные пластины

Более универсален способ наплавки с вдуванием порошка в дугу (рис. 12) [9]. Высокотемпературную плазменную струю создают две дуги: одна горит между вольфрамовым электродом и внутренним соплом, другая — между электродом и изделием. Каждая дуга питается от своего источника тока. Горелка (плазмотрон) имеет три сопла — внутреннее, наружное и защитное. Соответственно существуют три потока — центральный плазмообразующего газа (аргон, смесь аргона с 5—10% H_2 и др.); транспортирующий, несущий порошок, и защитный (аргон, смесь аргона с азотом и др.). Порошок вдувается несущим газом в зазор между внутренним и наружным соплом.

Плазменная наплавка с вдуванием порошка пригодна для нанесения слоя металла как более легкоплавкого, так и более тугоплавкого, чем основной металл. Производительность одного плазмотрона — до 12 *кг/ч*. Возможна наплавка тонких плотных слоев (0,3 *мм*) при минимальном, но вполне надежном проплавлении металла изделия [9,59]. Способ особо ценен при наплавке жаропрочных, коррозионностойких и износостойких сплавов, когда требуется обеспечить минимальную долю основного металла.

Наплавка плавящимся электродом в защитном газе. Механизированная наплавка внутренних поверхностей глубоких отверстий, когда нужно исключить образование шлаковой корки на наплавленном валике, а также полуавтоматическая наплавка деталей сложной формы являются областями применения наплавки в защитном газе. Чаще всего применяется полуавтоматическая наплавка в углекислом газе. Электродом служит легированная проволока подходящего состава или порошковая проволока. Поскольку углекислота окисляет химически активные примеси, в проволоку обязательно вводятся раскислители — кремний, титан и др. Разработаны составы порошковой проволоки для наплавки ряда легированных сталей [32].

Чтобы уменьшить разбрызгивание, наплавку в углекислом газе ведут очень короткой дугой, при которой переход капель металла происходит с короткими замыканиями.

Недостатком наплавки в углекислом газе является довольно большое разбрызгивание, которое приводит к налипанию брызг на мундштук и к закупорке сопла горелки. Кроме того, сдувание струи защитного газа ветром затрудняет наплавку этим способом на открытом воздухе.

Наплавка порошковой проволокой. Относительный расход порошковой проволоки составляет 1,2—1,4 *кг* на 1 *кг* наплавленного металла. Тонкий слой шлака обычно не мешает наплавке с перекрытием валиков без удаления шлаковой корки. Возможность видеть дугу и управлять ею позволяет легко наплавлять

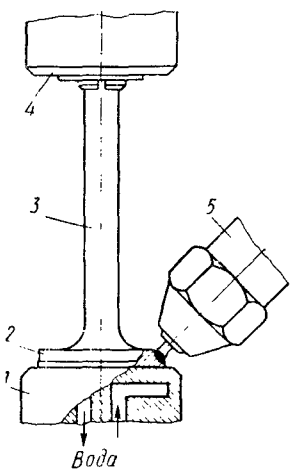


Рис. 11. Схема наплавки клапана плазменной дугой: *1* — медная подкладка; *2* — присадочное кольцо; *3* — клапан; *4* — патрон вращателя; *5* — горелка

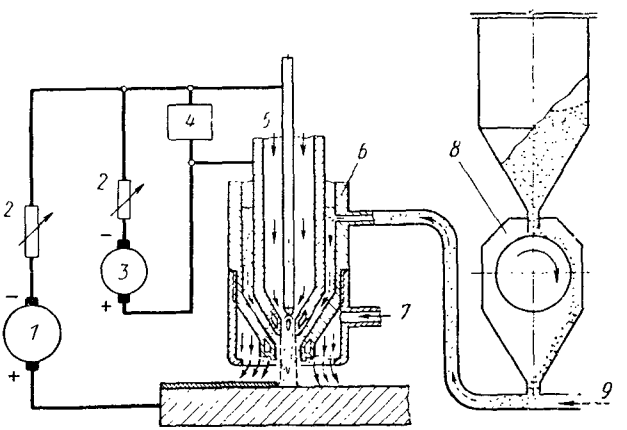


Рис. 12. Схема плазменной наплавки с вдуванием порошка в дугу: *1* — источник питания дуги прямого действия; *2* — балластное сопротивление; *3* — источник питания дуги косвенного действия; *4* — осциллятор; *5* — ввод рабочего газа; *6* — горелка; *7* — ввод защитного газа; *8* — питатель; *9* — ввод транспортирующего газа

детали сложной формы. Коэффициент наплавки для проволоки большинства марок составляет 13—15 *г/а · ч*, т. е. значительно выше, чем при наплавке штучными электродами. Наиболее употребительные режимы наплавки указаны в табл. 2.

2. Характерные режимы наплавки порошковой проволокой

Диаметр проволоки в *мм*	Ток в *а*	Напряжение дуги в *в*	Скорость наплавки в *м/ч*
2,2—2,6	250—280	21—23	16—22
2,8—3,0	340—380	22—24	20—30

Потери на угар и разбрызгивание составляют 5—15%. При правильном выборе режима возможна высокопроизводительная наплавка не только в нижнем положении, но и на наклонные поверхности, на кромки детали, на вертикальные бурты тел вращения и проч. [45].

Газопламенная наплавка. Ацетилено-кислородное пламя используется для наплавки легкоплавких металлов и сплавов, обычно с температурой плав-

ления не свыше 1200° С. Технология и техника ацетилено-кислородной наплавки с присадкой прутка рассмотрена в т. 2, стр. 305—311. Применяется также наплавка с вдуванием порошка (размер частиц 0,07—0,15 *мм*), который вносится в пламя сжатым воздухом. Пламя нагревает поверхность изделия и расплавляет частицы порошка, наплавляется слой толщиной до 3 *мм* при минимальном проплавлении основного металла. Производительность установки — до 1,5 *кг/ч* наплавленного металла.

Для нанесения баббита на детали узлов трения применяется водородно-кислородная наплавка [12], которая осуществляется после полного или частичного удаления старого слоя баббита, обезжиривания, травления, флюсования и лужения наплавляемой поверхности. Наплавку производят с помощью обычной (ацетилено-кислородной) горелки, которую регулируют так, чтобы в пламя поступало 90% (по объему) водорода и 10% кислорода. При наплавке мелких деталей вместо кислорода используют воздух, что на 200—300° С снижает температуру пламени. Износостойкость наплавленного баббита значительно выше, чем залитого обычными способами.

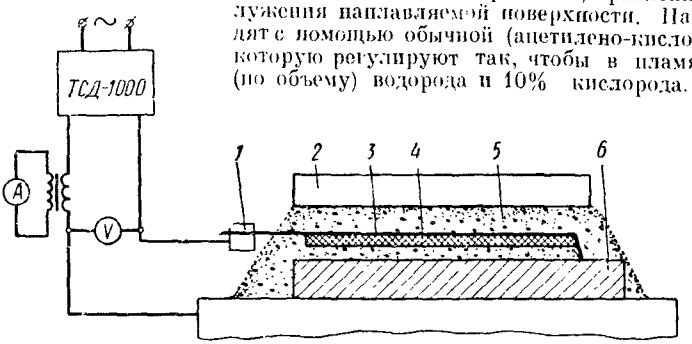


Рис. 13. Схема наплавки лежачим пластинчатым электродом: *1* — подвод тока; *2* — медная плита; *3* — электрод; *4* — легирующая обмазка; *5* — флюс; *6* — изделие

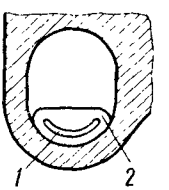


Рис. 14. Лежачий электрод в изношенной проушине трака: *1* — стержень; *2* — покрытие

Вибродуговая наплавка благодаря простоте и универсальности получила значительное применение в восстановительном ремонте деталей автомобилей, тракторов, сельскохозяйственных машин, электродвигателей насосных установок и проч. Основы процесса описаны в т. 2 (стр. 596—602).

Наплавка лежачим пластинчатым электродом (рис. 13). На поверхность изделия, подлежащую наплавке, насыпают слой флюса толщиной 3—5 *мм*. На флюс кладут электрод, обычно представляющий собой тонкую пластину из малоуглеродистой стали с насыпанным слоем смеси ферросплавов с железным порошком (иногда применяют также электроды из легированной стали или электроды с обмазкой из порошка ферросплавов и растворимого стекла). Один конец электрода, отогнутый вниз, касается поверхности изделия, а другой — свободный, служит для подвода тока. Электрод засыпают слоем флюса толщиной 10—15 *мм*, и укладывают сверху массивную медную пластину. При включении тока возникает дуга и электрод постепенно плавится. На поверхность изделия наплавляется слой, ширина и длина которого примерно равны размерам электрода. Глубина проплавления получается очень малая. Плотность тока, считая только на сечение стальной пластины, выбирают 5—9 *а/мм*^{2}; напряжение составляет 35—45 *в*.

Ценной особенностью способа является возможность наплавки в трудно-доступных местах (рис. 14). Он применяется, в частности, для восстановления проушин траков диаметром 20—40 *мм*, длиной в 2—5 раз больше диаметра.

Создана механизированная наплавочная установка У203, с помощью которой восстанавливается 8—12 траков в час [2].

Электроимпульсная наплавка. Используют искровой разряд, либо дугу весьма малой длительности. Глубина зоны термического влияния получается больше, чем собственно наплавленный слой, ввиду чего нередко применяется термин «электроискровое упрочнение».

Искровой разряд получается при питании от специальной электрической схемы с конденсатором, подключенным параллельно разрядному промежутку (рис. 15). В качестве электродов служат палочки из металлокерамических твердых сплавов или из графита. Толщина упрочненного слоя получается 0,1—0,3 *мм*, производительность 0,2—0,3 *см*^{2} упрочненной поверхности за 1 *мин* [14, 24].

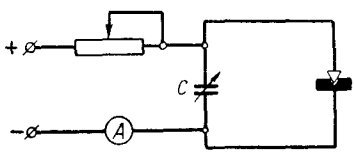


Рис. 15. Принципиальная схема устройства для электроискрового упрочнения

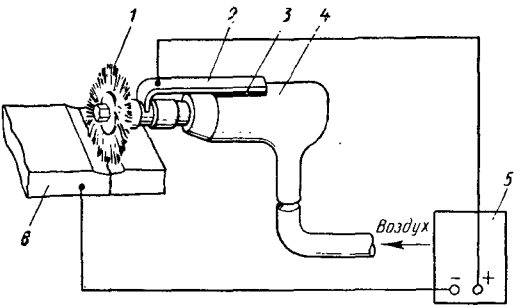


Рис. 16. Схема микронаплавки вращающейся металлической щеткой: *1* — щетка из 1000 проволок ⌀1 *мм*; *2* — скользящий контакт; *3* — изоляционная прокладка; *4* — пневмодрель; *5* — выпрямитель; *6* — деталь

Дуговая электроимпульсная наплавка осуществляется при питании от источника постоянного тока низкого напряжения, дуговой разряд возникает за счет экстратока размыкания. Этот принцип лежит в основе вибродуговой наплавки. Он используется также при микронаплавке вращающейся металлической щеткой (рис. 16) [30]. Толщина наплавленного слоя 0,6—0,8 *мм*, производительность наплавки около 7 *г/ч*.

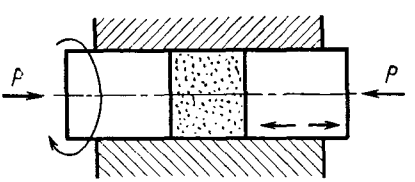


Рис. 17. Схема наплавки трением на торцовую поверхность

Наплавка трением. Этот метод еще не получил промышленного применения. Сущность его заключается в быстром вращении присадочного прутка (1500—4000 *об/мин*), который торцом прижимается к наплавляемой поверхности. Металл нагревается, становится пластичным и «намазывается» на поверхность изделия. Часть металла выдавливается в радиальном направлении. На прутке образуется грибовидное утолщение, которое срезается резцом [41]. Наплавка трением износостойкого слоя на тонкие ножи жатвенных машин дала хорошие результаты: несмотря на наличие оксидных пленок в пограничном слое прочность сцепления оказалась достаточной. Предложена также наплавка трением с расплавлением легкоплавкого присадочного металла, например, бронзовой стружки, по схеме, показанной на рис. 17.

Наплавка с помощью контактной сварки. Предложен процесс, при котором присадочная проволока поступает в зазор между электродом и поверхностью наплавляемого вала. Вал поворачивается толчками (вращение чередуется с паузами). В момент, когда деталь неподвижна, электрод прижимается и пропускается импульс сварочного тока, разогревающий участок проволоки, который приваривается к детали. В следующий момент деталь проворачивается на неко-

торый угол, наматывая на себя очередной участок проволоки, после чего цикл повторяется. При наплавке проволоки диаметром 2 *мм* толщина наплавленного слоя получается 1,4 *мм*. Производительность опытной установки около 0,4 *кг/ч* [17].

Легирование металла наплавки [1]

Пути легирования. Для изготовления штучных наплавочных электродов применяют как малоуглеродистую, так и легированную проволоку, а также литые прутки и порошковую проволоку. Если стержнем покрытого электрода служит малоуглеродистая проволока, то все легирующие элементы необходимо ввести через покрытие. Коэффициент перехода таких примесей, как Mn, V, Si, ниже 0,6, а Ti и C — ниже 0,5. Значительное окисление активных элементов может приводить к нарушению заданного состава металла. Более устойчивые результаты получаются, если легко окисляющиеся примеси вводятся не через покрытие, а через проволоку.

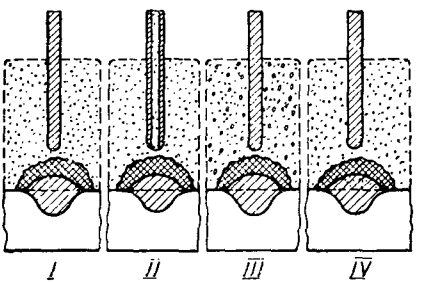
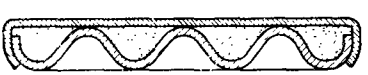


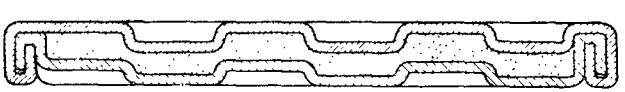
Рис. 18. Схема четырех основных путей легирования при наплавке под флюсом: *I* — легированная электродная проволока или лента, обычный флюс; *II* — порошковая проволока или лента, обычный флюс; *III* — обычная проволока или лента, легирующий флюс; *IV* — обычная проволока, обычный флюс, дозированная засыпка легирующих материалов

Такой путь легирования обычно используется при наплавке высокохромистых и хромоникелевых нержавеющих сталей, а также быстрорежущей стали. Наплавку высокохромистого чугуна — сормайта, а также кобальтового сплава — стеллита производят литыми прутками соответствующего состава с нейтральным покрытием. Порошковую проволоку (трубчатые электроды) применяют для наплавки высокомарганцовистого износостойкого сплава [25].

При наплавке под флюсом могут быть применены четыре основных метода легирования (рис. 18), а также различные их комбинации. Наиболее надежные и устойчивые результаты дает использование однородного легированного электродного материала (метод *I*), особенно при наплавке высоколегированных сталей и



а)



б)

Рис. 19. Порошковая электродная лента: *а* — конструкция О. А. Бакши и др. [5]; *б* — конструкция Ю. А. Юзвенко [55]

сплавов. Наряду с обычной холоднокатаной лентой находит применение литая лента, а в отдельных случаях — металлокерамическая лента, изготовленная прокаткой смеси тонких порошков с последующим спеканием.

Кроме порошковой проволоки для легирования по методу *II* используют порошковую ленту (рис. 19) [5, 55] с продольными и поперечными гофрами, преду-

[1] Общие основы легирования металла шва при сварке плавлением рассмотрены в т. I (стр. 130—138).

предшествующими вдуванию порошка. В порошковую проволоку удается ввести до 40% легирующих примесей, в порошковую ленту — до 70%.

Легирующие флюсы (метод *III*) применяются как плавленые, из которых восстанавливаются хром, марганец и кремний, так и флюсы-смеси, содержащие примесь металлического порошка, а также керамические неплавленые флюсы (см. т. 2, стр. 134). Во всех вариантах этого метода легирующие компоненты равномерно распределены в объеме флюса. В состав наплавленного металла этим путем удается ввести до 35% легирующих примесей [46].

Важным преимуществом легирующих флюсов, содержащих много металлических составляющих, является малая глубина проплавления и низкая доля участия основного металла в металле наплавки (рис. 20) [56].

К *IV* методу легирования относятся различные приемы предварительной засыпки и дозированной подачи легирующего порошка, который полностью расплавляется дугой, а также укладка прутка или полоски легированной стали, намазывание паст и др.

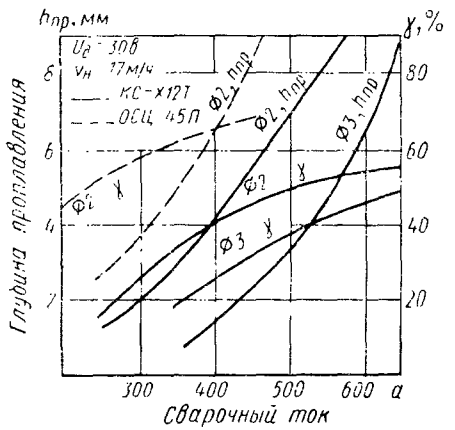


Рис. 20. Влияние тока на глубину проплавления и долю γ основного металла при наплавке малоуглеродистой проволокой

Нередко применяются комбинации различных методов легирования. Например, при наплавке аустенито-ферритной хромоникель-кремнистой стали электродом служит стандартная хромоникелевая проволока, а дополнительное легирование кремнием производится с помощью керамического флюса (методы *I* и *III*). Предложена также наплавка с подачей добавочной порошковой проволоки, при которой сочетаются методы *IV* и *II*.

Электрошлаковая наплавка может производиться с использованием порошкового электрода большого сечения, а также «порошкового плавящегося мундштука». Используются также кованые, катаные и литые электроды большого сечения.

Влияние параметров режима на химический состав наплавленного металла. Изменение режима наплавки оказывает сильное влияние на химический состав металла наплавки. Это является следствием двух причин: 1) изменения доли участия основного металла в образовании наплавленного валика и 2) изменения полноты протекания химических реакций между металлом и окружающей средой. При многослойной наплавке, когда доля основного металла становится пренебрежимо малой, решающее значение имеет вторая причина.

Если примесь не окисляется и не восстанавливается (так ведет себя, например, никель) и поступает в металл наплавки только из электрода, то ее содержание в i-м слое можно вычислить по уравнению

$$R_{н} = R_{э} - R_{э}\gamma_{0}^{i},$$

где $R_{н}$ — содержание примеси в металле наплавки;

$R_{э}$ — то же в металле электрода;

γ_{0} — доля основного металла в металле наплавки.

При $\gamma_{0} = 0{,}3$ уже в третьем слое содержание данной примеси в металле наплавки практически не отличается от содержания в электродном металле.

В этом случае верхний слой представляет собой почти чистый наплавленный металл, т. е. металл электрода, прошедший металлургическую обработку в процессе наплавки.

При ручной дуговой наплавке штучными электродами изменение режима оказывает некоторое влияние на состав металла наплавки (табл. 3) [42].

3. Химический состав металла, наплавленного штучными электродами с низкоуглеродистым стержнем и покрытием фтористокальциевого типа на разных режимах

Тип покрытия	Режим		C	Mn	Si	Cr
	Ток в *а*	Напряжение в *в*	в %			
Э3 (с 12% высокоуглеродистого феррохрома)	125	22	0.37	2.32	0.97	3.08
	200	23	0.32	2.20	0.93	3.06
	300	27	0.29	2.15	0.90	3.08
Э4 (с 20% высокоуглеродистого феррохрома)	125	22	0.49	2.15	1.10	4.47
	200	23	0.44	2.17	1.00	4.44
	300	27	0.38	2.12	0.90	4.35

Существенное влияние режима на содержание углерода в наплавленном металле должно учитываться при наплавке ответственных деталей.

При сварке под флюсом температура капли электродного металла на торце электрода также очень высока, химические реакции его со шлаком протекают здесь очень быстро. Взаимодействие металла и шлака продолжается и в сварочной ванне. Поэтому при наплавке под флюсом, на химический состав наплавленного металла оказывают влияние параметры режима, от которых зависит характер переноса электродного металла и плавление флюса. Плавление флюса наиболее наглядно характеризует относительная масса шлака (флюса), т. е. количество расплавленного шлака в *кг*, приходящееся на 1 *кг* расплавленного электродного металла. На рис. 21 показано, как изменяется относительная масса шлака в зависимости от тока и напряжения при наплавке электродной проволокой. При наплавке лентой относительная масса шлака мало зависит от режима. Изменение относительной массы шлака приближенно определяет количество кислорода и легирующих примесей, участвующих в реакции; чем более окислительный характер имеет флюс, тем больше будет угар примесей, если применяется легирование по методу *I*, и наоборот, чем больше относительная

4. Химический состав металла, наплавленного под флюсом на трех режимах, при легировании по методам *I*, *II* и *III* (см. рис. 18)

Метод легирования	Ток в *а*	Напряжение в *в*	Результаты анализа в %					
			C	Si	Mn	Cr	W	V
I	330	40	0.28	0.91	0.75	2.34	8.1	0.33
II			0.26	0.93	0.62	2.30	8.0	0.27
III			0.49	0.92	0.88	3,53	10.0	0,50
I	350	30	0.33	0.73	0.96	2.54	8.3	0.36
II			0.34	0.65	0.77	2,47	8.3	0,32
III			0.35	0.75	0.76	2.45	8.1	0.35
I	610	27	0.38	0,45	1.23	2.58	8.5	0,38
II			0.44	0.47	1,12	2.68	9.0	0.35
III			0,22	0.40	0.46	0,81	2.8	0.12

масса шлака, тем сильнее будет легирование наплавленного металла при легировании через флюс (метод *III*, рис. 18). Данные, характеризующие влияние режима на химический состав металла при трех методах легирования при наплавке под флюсом представлены в табл. 4 и на рис. 22.

Если упрощенно принять, что состав наплавленного металла линейно зависит от напряжения при данном токе, то можно наглядно представить зависимость состава от режима. Для этой цели на диаграмму, построенную в

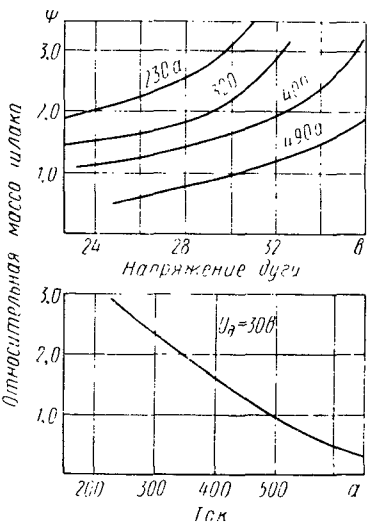


Рис. 21. Влияние тока и напряжения на относительную массу шлака при наплавке под легирующими керамическими флюсами КС-Р9Р и КС-Х12Т малоуглеродистой электродной проволокой [56]

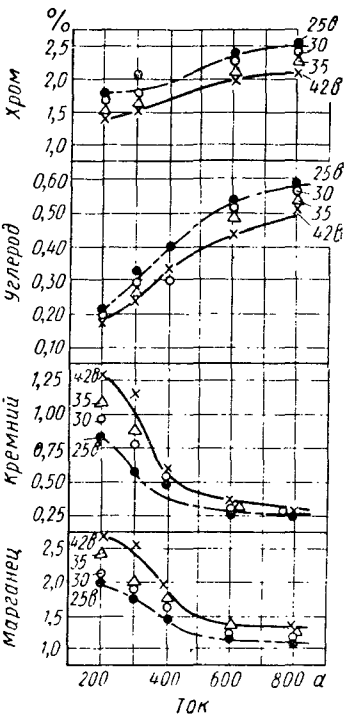


Рис. 22. Зависимость химического состава металла, наплавленного порошковой проволокой ПП-3Х2В8 под флюсом АН-348А, от тока и напряжения

координатах ток — напряжение, наносят линии равных концентраций того или иного элемента — изоконцентраты. На рис. 23 показана диаграмма состава наплавленного металла, построенная по данным графика рис. 22, с помощью которой можно с достаточной для практики точностью предсказать состав нап-

5. Химический состав проволоки и металла, наплавленного под разными флюсами

Металл	Содержание в %						
	C	Si	Mn	Cr	W	V	O
Проволока ПП-3Х2В8	0.72	0.31	1.60	2,78	9,20	0.40	—
Наплавленный под АН-30	0.42	0.25	1,46	2.65	8.52	0.34	0.006
То же АН-20	0.37	0,65	0.95	2,44	8.60	0.32	0.008
» АН-22	0.33	0.32	2.35	1.86	8.65	0.30	0.009
» АН-10	0.28	0.34	2,44	2.09	8.14	0.30	0.008
» АН348-А	0,24	0.70	1.81	1,95	7,40	0.31	0.010

лавленного металла. На рис. 24, *а* изображена область режимов, в пределах которой обеспечивается оптимальный состав наплавленного металла. Ширина полосы, в пределах которой возможно получение заданного состава наплавленного металла, зависит от окислительной способности флюса. В табл. 5 приведен химический состав металла, наплавленного одной и той же проволокой, на одинаковом режиме (ток 400 *а*, напряжение дуги 32 *в*, скорость наплавки 20 *м/ч*) под разными флюсами (состав флюсов, см. т. 2, стр. 131) [43].

При наплавке под легирующими флюсами область допустимых режимов получается более узкая, чем при легированной или порошковой проволоке (рис. 25).

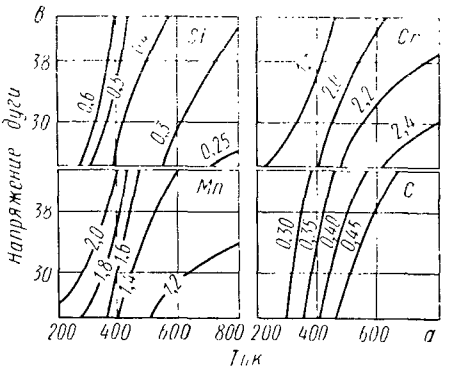


Рис. 23. Диаграмма состава наплавленного металла в зависимости от режима наплавки, рассчитанная по графику рис. 23. Проволока ПП-3Х2В8, флюс АН-348А

Наплавка с предварительным нанесением легирующих материалов возможна только на вполне определенном режиме, при тщательно подобранных условиях.

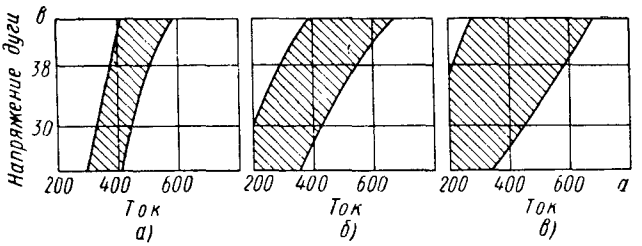


Рис. 24. Области режимов, в пределах которых металл, наплавленный проволокой ПП-3Х2В8, имеет оптимальный состав: *а* — под флюсом АН-348А; *б* — под флюсом АН-20; *в* — под флюсом АН-30

Глубина проплавления зависит от количества насыпанной присадки. Электрошлаковая наплавка производится обычно в пределах сравнительно узкого диа-

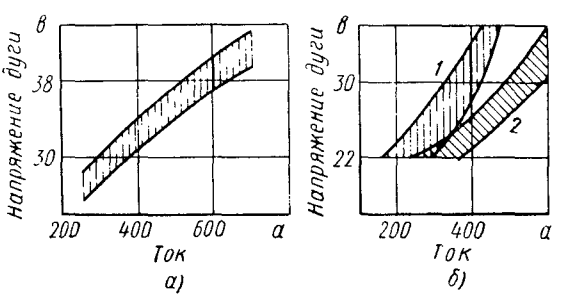


Рис. 25. Области режимов, в пределах которых наплавленный металл имеет заданный состав при наплавке малоуглеродистой проволокой под легирующим флюсом: *а* — типа АН-20 + + 25% феррохрома Хр1; *б* — типа КС-Х12Т; *1* — диаметр 2 *мм*; *2* — диаметр 3 *мм*

пазона оптимальных режимов. При наплавке в среде углекислого газа наблюдаются близкие соотношения: увеличение силы тока и уменьшение напряжения ослабляет взаимодействие компонентов металла с защитным газом.

Наплавленный металл

По упрощенной классификации наплавочные сплавы можно разделить на пять основных групп, которые подразделяются на подгруппы: I — стали (углеродистые, марганцовистые, хромомарганцовистые, хромистые, высокохромистые, высокоуглеродистые, хромоникелевые, низкоуглеродистые, высоковольфрамовые и молибденовые); II — сплавы на основе железа (высокохромистые чугуны, сплавы с бором и хромом, сплавы с кобальтом, молибденом или вольфрамом); III — сплавы на основе никеля и кобальта (хромоникелевые сплавы с бором и кремнием, никелевые сплавы с молибденом, сплавы кобальта с хромом и вольфрамом); IV — сплавы на основе меди (алюминиевые бронзы, оловянистофосфористые бронзы); V — карбидные сплавы (с карбидом вольфрама или хрома).

Действующий в СССР ГОСТ 10051—62 «Электроды металлические для дуговой наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами» не предусматривает классификации материалов по составу или твердости. ГОСТ 10543—63 «Проволока стальная наплавочная» разделяет проволоку на три группы: углеродистая, легированная и высоколегированная.

6. Рекомендуемое сочетание основного и наплавленного металла

Основной металл	Наплавленный металл на основе					
	железа при легировании		никеля	кобальта	карбида вольфрама	
	менее 20%	более 20%			Вставка	Наплавка
Углеродистые стали:						
0.10—0.35% С	а ÷ б	а ÷ б	а ÷ б	а ÷ б	а ÷ б	а ÷ б
0.35—1.00% С	а ÷ б	а ÷ б	а ÷ б	а ÷ б	а ÷ б	а ÷ б
Низколегированные строительные и конструкционные стали	а ÷ б	а ÷ б	а ÷ б	а ÷ б	а ÷ б	а ÷ б
Серый, ковкий и модифицированный чугун	б ÷ в	б ÷ в	б ÷ в	б ÷ в	б ÷ в	б ÷ в
Слабо закаливающиеся мартенситные нержавеющие стали типа 1Х13	—	а ÷ е	а ÷ е	а ÷ е	а ÷ е	а ÷ е
Сильно закаливающиеся мартенситные нержавеющие стали типа Х17	—	а, б, е	а, е	а, е	а, е	а, е
Аустенитные стали типа 1Х18Н9Т	— в	г	г	г	г	г
Аустенитные стали типа 1Х18Н10Б	—	г	в	г	г	г
Аустенитные стали (другие типы)	—	в	г	г	г	г
Никелевые сплавы	—	в	г	г	г	г
Монель-металл	—	в	г	г	г	г
Сталь типа Г13	д	д	д	д	д	д

Примечание. Общие технологические указания: а — необходим предварительный подогрев; б — лучшие результаты обеспечиваются при газопламенной наплавке; в — применяется ограниченно; г — в качестве промежуточного слоя рекомендуется использовать сталь типа 1Х18Н10Б или ей подобную; д — в качестве промежуточных слоев следует использовать никелевые сплавы; е — необходим изотермический отжиг.

Основной металл

При изготовлении биметаллических деталей посредством наплавки, как правило, в качестве основы применяют углеродистые или низколегированные стали. При восстановлении деталей приходится сталкиваться с различными составами основного металла. Правильное сочетание основного и наплавленного металла приобретает особое значение, если в последующем предусматривается термообработка биметаллических деталей. В табл. 6 приведено рекомендуемое сочетание основного и наплавленного металла [60].

Для предупреждения отколов наплавленного слоя технология наплавки должна обеспечить минимальные напряжения и деформации, хорошее сплавление и отсутствие в зоне термического влияния сварки закалочных структур. При наплавке на углеродистые стали, содержащие менее 0,28% С, предварительный подогрев не требуется. Необходимость предварительного подогрева зависит также от сочетания основного и наплавленного металла и от размеров и формы наплавляемого изделия.

Трудными для наплавки являются высоколегированные инструментальные стали вследствие повышенной склонности к образованию трещин. Поэтому при наплавке на изделия из таких сталей принимаются особые предосторожности. В табл. 7 приведены рекомендуемые термические условия наплавки.

7. Рекомендуемые термические условия наплавки деталей из инструментальных и высоколегированных сталей

Основной металл	Температура в °С			Примечание
	перед наплавкой	в процессе наплавки	после наплавки	
Х12	500—550	500—550	600—700	—
3Х2В8	500—550	500—550	500—550	Изотермическая наплавка. Отпуск после наплавки при 600° С
Р9, Р18	1250, подстуживание до 500—550	500—550	560	Отпуск при 560° С
Г13	Минимальные тепловложение и проплавление			Охлаждение в процессе наплавки

НАПЛАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Металлические электроды для ручной дуговой наплавки

В СССР разработано около 70 марок наплавочных электродов. Кроме того, для наплавки могут использоваться сварочные электроды общего назначения, а также электроды, предназначенные для сварки специальных сталей и сплавов.

В табл. 8 приведены сведения об электродах, специально предназначенных для наплавочных работ, выпуск которых освоен в промышленных масштабах [53].

Электродная проволока и лента для механизированной наплавки

Основными электродными материалами для механизированной наплавки являются проволока сплошного сечения, порошковая проволока, лента холодного проката и литая лента. Марки и химический состав стальной наплавочной проволоки приведены в табл. 9. Для наплавки применяются также сварочные

8. Наплавочные электроды, выпускаемые советской промышленностью

Марка электрода	Тип по ГОСТу 10051–62	Типичный химический состав наплавленного металла в %									Твердость[1] *HRC*
		C	Si	Mn	Cr	W	V	Прочие	S	P	
ОЗН-250	Э11-15Г3-25	0,15	Следы	2,4	—	—	—	—	0,03	0,04	22/25
ОЗН-300	Э11-15Г3-25	0,15	»	3,2	—	—	—	—	0,02	0,035	24/32
ОЗН-350	Э11-18Г4-35	0,18	»	3,8	—	—	—	—	0,03	0,04	26/37
ОЗН-400	Э11-20Г4-40	0,20	»	4,2	—	—	—	—	0,02	0,03	37/40
У340 п/б	Э11-15Г3-25	0,16	0,5	2,7	—	—	—	—	0,018	0,03	27/31
К-2-55	Э11-14Г2Х-30	0,14	0,5	1,8	1,0	—	—	—	0,032	0,021	35/32
ОЗШ-1	Э11-14Г2Х-30	0,14	0,8	1,0	1,0	—	—	0,8Mo	—	—	35/34
ЭН-40	—	0,57	0,40	0,65	1,9	—	—	—	0,03	0,03	35/40
ЭН-50	Э11-60Х2СМ-50	0,68	0,50	0,75	2,0	—	—	—	—	—	32/50
ЭН-60	Э11-80Х4СГ-55	0,95	0,90	0,80	2,6	—	—	—	0,012	0,016	58/58
ЭН-60М	Э11-60Х2СМ-50	0,8	1,10	0,70	2,6	—	—	0,5Mo	—	—	*HB* 190/59
13КП/ЛИИВТ	Э11-80Х4СГ-55	0,8	0,95	0,80	4,2	—	—	—	0,027	0,016	48/54
НЖ-2	Э11-25Х12-40	0,23	0,6	0,9	13,0	—	—	—	0,02	0,03	40/48
Т-546А	—	1,22	2,1	0,79	7,2	—	—	1,43Ti	0,024	0,008	52/52
ОМГИ:											
1-й слой	Э11-70Х11Н3-25	0,79	0,07	5,65	6,48	—	—	2,48Ni	0,014	0,040	22
3-й »		1,00	0,26	0,70	11,28	—	—	2,59Ni	0,020	0,013	25
НМ-1М	Э11-80В18Х4Ф-60	0,8	—	0,8	5,5	19,2	1,1	—	0,018	0,008	58/60
ОЗШ-1	»	0,8	0,4	0,65	4,1	16,8	1,1	—	0,035	0,035	55/60
НТ-10	»	0,9	0,6	0,7	4,8	17,0	1,4	—	—	—	60/60
ГП-1	Э11-У30Х28С4Н4-50	2,43	2,48	0,6	27,6	—	—	3,91Ni	—	—	49/52
Т-590	Э11-У30Х25 РС2Г-60	3,2	2,2	1,2	25,0	—	—	1,0B	—	—	55/62
Т-620	Э11-У30Х23РС2ТГ-55	3,2	2,2	1,2	23,0	—	—	1,58B 1,3Ti	—	—	58/59
ИН-1	Э11-30Х3В8-40	0,35	0,7	1,0	2,5	8,5	0,3	—	0,03	0,03	52/54
ОЗИ-2	»	0,6	0,5	0,8	2,5	10,0	0,5	—	—	—	55/54
ЦН-2	Э11-У18К62Х30В5С2-40	1,85	1,9	0,2	31,0	4,5	—	62,0Co	—	—	43/45
ЦН-6	Э11-08Х17Н17С5Г2-30	0,06	5,4	1,25	17,0	—	—	8,0Ni	0,007	0,022	27/32
ВСН-6	—	1,2	0,65	0,8	13,0	13,3	1,6	—	0,036	0,014	35/55
12АНЛИИВТ	Э11-У10Г5Х7С-25	1,05	0,4	5,6	7,3	—	—	—	0,025	0,040	26/27
ЭНХД-10	—	0,02	11,5	—	—	—	—	Основа Ni 7,2Al 2,7Fe 3,2Cu	—	—	44/45
УНИ-30Х10Г10	—	0,28	0,3	10,0	10,0	—	—	0,2Ti	0,02	0,03	45/20

[1] В числителе – однослойной наплавки, в знаменателе – верхнего слоя четырехслойной наплавки.

9. Марки и химический состав стальной наплавочной проволоки (ГОСТ 10543—63)

Марки стали	Содержание элементов в %										Примерная твердость наплавленного металла
	C	Mn	Si	Cr	Ni	W	V	S (не более)	P (не более)	Прочие элементы	
Углеродистая сталь											
Нп-30	0,27—0,35	0,5—0,8	0,17—0,37	⩽ 0,25	⩽ 0,25	—	—	0,040	0,040	—	*HB* 160—220
Нп-40	0,37—0,45										*HB* 170—230
Нп-50	0,47—0,55										*HB* 180—240
Нп-65	0,60—0,70										*HB* 220—300
Нп-80	0,75—0,85										*HB* 260—340
Нп-40Г	0,35—0,45	0,7—1,0									*HB* 180—240
Нп-50Г	0,45—0,55										*HB* 200—270
Нп-65Г	0,60—0,70	0,9—1,2									*HB* 230—310
Легированная сталь											
Нп-10ГЗ	⩽ 0,2	3,0—3,7	⩽ 0,3	⩽ 0,3	⩽ 0,30	—	—	0,040	0,040	—	HB 250—300
Нп-30ХГСА	0,27—0,35	0,8—1,1	0,9—1,2	0,8—1,1	⩽ 0,40	—	—	0,030	0,040	—	HB 220—300
Нп-30ХЗВА	0,27—0,35	0,3—0,6	0,17—0,37	2,8—3,3	⩽ 0,50	0,8—1,1	—	0,030	0,040	—	*HRC* 33—40
Нп-30Х5	0,27—0,35	0,4—0,7	0,20—0,50	4,0—6,0	⩽ 0,40	—	—	0,040	0,040	—	*HRC* 37—42
Нп-35Х2Г2В	0,3—0,4	2,2—2,7	0,40—0,70	2,2—2,7	⩽ 0,40	0,8—1,2	—	0,040	0,040	—	*HRC* 37—42
Нп-40Х3Г2ВФ	0,35—0,45	1,3—1,8	0,40—0,70	3,3—3,8	⩽ 0,40	0,8—1,2	0,10—0,20	0,040	0,040	—	*HRC* 38—44
Нп-5ХНМ	0,5—0,6	0,5—0,8	⩽ 0,35	0,50—0,80	1,40—1,80	—	—	0,030	0,030	0,15—0,30Mo	*HRC* 40—50
Нп-5ХНТ	0,50—0,60	0,5—0,8	⩽ 0,35	0,90—1,25	1,40—1,80	—	—	0,030	0,030	0,08—0,15Ti	*HRC* 40—50
Нп-5ХНВ	0,5—0,6	0,5—0,8	0,15—0,35	0,50—0,80	1,40—1,80	0,6—1,0	—	0,030	0,030	—	*HRC* 40—50
Нп-50ХФА	0,46—0,54	0,5—0,8	0,17—0,37	0,8—1,1	⩽ 0,40	—	0,10—0,20	0,030	0,035	—	*HRC* 43—50
Нп-105Х	0,95—1,10	0,2—0,4	0,15—0,35	1,30—1,65	⩽ 0,30	—	—	0,030	0,035	—	*HRC* 32—38
Высоколегированная сталь											
Нп-2Х14	0,16—0,24	⩽ 0,6	⩽ 0,6	13,0—15,0	⩽ 0,60	—	—	0,030	0,035	—	*HRC* 32—38
Нп-3Х13	0,25—0,34	⩽ 0,6	⩽ 0,6	12,0—14,0	⩽ 0,60	—	—	0,030	0,035	—	*HRC* 38—45
Нп-4Х13	0,35—0,45	⩽ 0,6	⩽ 0,6	12,0—14,0	⩽ 0,60	—	—	0,030	0,035	—	*HRC* 45—52
Нп-45Х4В3Ф	0,40—0,50	0,8—1,2	0,7—1,0	3,6—4,1	⩽ 0,60	2,5—3,0	0,2—0,4	0,040	0,040	—	*HRC* 38—45
Нп-45Х2В8Т	0,40—0,50	1,0—1,4	0,40—0,70	2,5—3,0	⩽ 0,60	8,0—9,5	0,3—0,5	0,040	0,040	0,5—0,9Ti	*HRC* 40—46
Нп-60Х3В10Ф	0,55—0,65	1,3—1,8	0,40—0,70	2,6—3,1	⩽ 0,30	9,0—10,5	0,3—0,5	0,040	0,040	—	*HRC* 42—50
Нп-Х15Н60	⩽ 0,15	⩽ 1,5	⩽ 1,0	15,0—18,0	55,0—61,0	—	—	0,025	0,035	—	HB 180—220
Нп-Х20Н80Т	⩽ 0,12	⩽ 0,7	⩽ 0,8	19,0—23,0	⩽ 75,0	—	—	0,025	0,020	⩽ 0,4Ti	HB 180—220
Нп-Г13А	1,0—1,2	12,5—14,5	⩽ 0,4	⩽ 0,6	⩽ 0,60	—	—	0,030	0,035	—	HB 220—280

10. Марки порошковой проволоки для наплавки под флюсом

Марка порошковой проволоки	Химический состав наплавленного металла в %							Примерная твердость наплавленного металла *HRC*
	C	Si	Mn	Cr	W	V	Прочие элементы	
ПП-25Х5ФМС	0,20—0,30	0,9—1,3	0,4—0,8	4,8—5,5	—	0,3—0,5	0,9—1,3Mo	40—46
ПП-3Х2В8	0,30—0,40	0,5—0,7	0,6—0,7	2,2—2,7	7,5—9,5	0,2—0,5	—	44—50
ПП-4Х4В3Ф	0,40—0,50	0,7—1,0	0,8—1,2	3,6—4,1	2,5—3,0	0,2—0,4	—	38—45
ПП-У20Х12ВФ	1,7—2,1	≤ 0,6	0,4—0,6	11,0—13,0	0,9—1,2	0,15—0,25	—	55—62
ПП-У30Х25Н4С4	2,5—3,5	3,2—3,6	0,3—0,5	23,0—26,0	—	—	3,4—3,8Ni	48—54
ПП-Х10В14	3,3—3,8	0,3—0,5	0,2—0,4	8,8—10,5	13,0—14,5	—	—	58—65

11. Марки порошковой проволоки с внутренней защитой для наплавки открытой дугой

Марка проволоки	Химический состав наплавленного металла в %							Примерная твердость наплавленного металла *HRC*
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Прочие элементы	
ПП-1Х14Т-0	0,12—0,20	0,3—0,6	0,3—0,6	12,5—14,5	—	—	0,12—0,24Ti	42—46
ПП-2Х4В3Ф-0	0,18—0,25	≤ 0,5	0,6—1,0	3,8—4,5	0,3—0,6	—	3,0—4,2W	36—44
ПП-25Х5МФС-0	0,20—0,30	0,9—1,3	0,4—0,8	4,8—5,5	0,9—1,3	0,3—0,5	—	40—44
ПП-Г13Н4-0	0,80—1,00	0,3—0,6	13,0—14,0	—	—	—	3,5—4Ni	*HB* 170—190
ПП-У25Х17Т-0	2,3—3,2	≤ 0,5	1,0—1,5	15,0—21,0	—	—	0,1—0,3Ti	40—48
ПП-У30Х14МСФ-0	2,6—3,2	0,8—1,0	0,3—0,6	13,0—15,0	1,2—1,5	0,1—0,2	0,2—0,4Ti	48—52
ПП-Ч2	3,5—4,5	3,0—3,8	0,5—1,0	—	—	0,3—0,6	0,2—0,5Ti	*HB* 160—180
ПП-У35Х17РТ-0	3,3—3,8	≤ 0,5	≤ 0,8	16,0—18,0	—	—	0,3—0,5Ti 0,8—1,1B	54—58

проволоки по ГОСТу 2246—69*. Обычно, для полуавтоматической наплавки применяют проволоку диаметром 1,6—2 *мм*, а для автоматической 2—5 *мм*. Иногда используют и катанку диаметром 6,5 *мм*. Для вибродуговой наплавки часто применяют пружинную проволоку по ГОСТам 9389—60*, 1071—67 и др. Для наплавки бронзы на сталь используется проволока Бр.АЖМц 10-3-1,5, изготовляемая по ТУ ЦМО 15/18-53.

Порошковая проволока выпускается для наплавки под флюсом, в среде защитных газов и открытой дугой. Для восстановления размеров деталей или для создания промежуточного слоя может применяться сварочная порошковая проволока.

Марки порошковых проволок для наплавки под флюсом и без дополнительной защиты приведены в табл. 10 и 11.

Порошковые проволоки для наплавки в среде защитного газа распространения не получили и изготовляются отдельными предприятиями для собственных нужд.

Для наплавки под флюсом применяется также холоднокатаная, литая и порошковая электродная лента, началось использование металлокерамической ленты. Из различных марок холоднокатаной ленты чаще других применяется лента из пружинных сталей 65Г и 50ХФА, а также из нержавеющих сталей (табл. 12). Лента холодного проката изготовляется по ГОСТам 2284—69, 2283—69, 4986—70 и др. Обычно применяется лента толщиной от 0,4 до 1 *мм* и шириной 20—100 *мм*. В зависимости от размеров наплавляемых изделий и мощности источника питания плотность тока при наплавке составляет не менее 10—15 *а/мм*^{2}.

12. Марки и химический состав холоднокатаной стальной ленты, используемой в качестве электродной при наплавке под флюсом

Марка стали	Химический состав в %					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Прочие элементы
65Г	0,60—0,70	0,17—0,37	0,90—1,20	≤ 0,30	≤ 0,30	—
50ХФА	0,46—0,54	0,17—0,37	0,80—1,00	0,95—1,20	0,40	0,15—0,25V
1Х13	≤ 0,15	≤ 0,60	≤ 0,60	12—14	0,60	—
1Х18Н9Т	≤ 0,12	≤ 0,80	≤ 2,0	17,0—20,0	8,0—11,0	(C—0,03)×5, но не более 0,8Ti
Х13НГ9	0,15—0,30	≤ 0,80	8,0—10,0	12,0—14,0	3,7—5,0	—

Литая лента (табл. 13) выпускается толщиной 0,7—1,0 *мм*, шириной 30—100 *мм* в зависимости от заказа, допуск по ширине 1 *мм*. Лента поставляется в термически обработанном состоянии (отожженная), она выдерживает загиб на 180° на оправке радиусом 20 *мм*. Лента поставляется в плотных рулонах с внутренним диаметром 200—210 *мм*, длина ленты должна составлять не менее 40 *м*. Преимуществом литой ленты является ее относительно низкая стоимость.

13. Марки и химический состав литых электродных лент

Марка ленты и технические условия	Химический состав в %					
	C	Si	Mn	Cr	S	P
ЛЛ-У30ГС РТУ УССР 982—65	2,8—3,5	1,2—1,8	0,6—1,5	—	≤ 0,10	≤ 0,10
ЛЛ-4Х13 РТУ УССР 983—65	0,6—0,8	0,4—0,8	≤ 0,9	14,0—17,0	≤ 0,04	≤ 0,04

Из высоколегированных сплавов с большим содержанием углерода невозможно изготовить пластичную ленту. В таких случаях эффективно используется порошковая лента (см. рис. 19). Целесообразно ее применение главным образом для однослойной наплавки массивных изделий, где требуется наплавить большое количество металла и возможно применение тока до 1500 *а*. Характеристика лент, получивших довольно большое практическое применение, приведена в табл. 14. Лента выпускается размером 20 × 3 *мм*.

14. Химический состав порошковой ленты и твердость наплавленного металла

Марка ленты	Химический состав наплавленного металла в %						Твердость *HRC*
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	
ПЛ-300Х25Н3С3	3,0	3,0	0,8	25,0	3,0	–	52–57
ПЛ-400Х25Г6Т	4,2	0.8	6,2	25,0	–	0,2	

Наплавка лентами указанного состава производится под флюсом АН-20 либо открытой дугой. В последнем случае частичное окисление углерода, содержащегося в сердечнике ленты, создает газовую защиту расплавленного металла.

Порошковая лента ПЛ-300Х25Н3С3 применяется для наплавки конусов и чаш засыпных аппаратов доменных печей, а лента ПЛ-400Х25Г6Т — футеровок конусных дробилок, валков размола кокса и т. п.

Ценными технологическими свойствами обладает металлокерамическая лента (табл. 15), изготовленная путем прокатки смеси металлических порошков

15. Химический состав металлокерамической ленты и наплавленного металла в %

Марка и технические условия	Материал	C	Mn	Si	Cr
ЛМ-5Х4В3Ф РТУ УССР 1243–68	Лента Наплавленный металл (флюс АН-28)	0,6 - 0,8 0,4–0,6	1,2–1,6 0,6–1,0	$\leqslant$ 0,3 $\leqslant$ 0,5	4,5–5,5 3,8–4,5
ЛМ-70Х3М РТУ УССР 1244–68	Лента Наплавленный металл (флюс АН-60)	0,9–1,3 0,6 - 0,8	0,7–1,0 0,7 - 1,1	0,7–0,9 1,0–1,2	4,2–5,0 2,5 - 3,1
Марка и технические условия	**Материал**	**W**	**V**	**Mo**	**Твердость *HRC***
ЛМ-5Х4В3Ф РТУ УССР 1243 -68	Лента Наплавленный металл (флюс АН-28)	3,5–4,5 3,0 - 4,2	0,6 0,8 0,3 - 0,5	– –	– 44 48
ЛМ-70Х3М РТУ УССР 1244–68	Лента Наплавленный металл (флюс АН-60)	– –	– –	0,7 - 0,9 0,4 - 0,6	– 55–58

и последующего спекания. Основой служит порошок пластичного металла (железа, меди или никеля). Благодаря этому готовая лента обладает вполне удовлетворительной прочностью и пластичностью.

Металлокерамическая электродная лента изготовляется толщиной 0,8—1,2 *мм*, шириной 25—100 *мм*, в зависимости от заказа. Плотность готовой ленты не ниже 6 *г/см*^{3}, предел прочности не менее 6 *кГ/мм*^{2}. Лента, спеченная в рулоне диаметром 180—200 *мм*, выдерживает разгибание до прямолинейности без разрушения и без образования трещин. Металлокерамическая лента применяется для наплавки при плотностях тока 10—30 *а/мм*^{2}, напряжении дуги 25—27 *в*. Преимуществом металлокерамической ленты является повышенная производительность наплавки (на 25—30% по сравнению с холоднокатаной лентой идентичного химического состава). Это обусловлено пористостью электрода, приводящей к соответствующему увеличению его электросопротивления, а значит и к усиленному нагреву вылета электрода в процессе его плавления. Благодаря равномерному распределению легирующих составляющих в объеме электрода металл, наплавленный металлокерамической лентой, более однороден, чем наплавленный порошковой лентой. Равномерная и однородная твердость наплавленного слоя способствует повышению его износостойкости.

Флюсы для механизированной наплавки

Составы флюсов общего назначения, применяемых для сварки и наплавки, см. в т. 2, стр. 131, а также в табл. 16 [35].

16. Плавленые флюсы для наплавки

Марка флюса	Строение зерен	Содержание в %								
		SiO_2	MnO	CaF_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Прочие	Fe_2O_3, S, P не более	
АН-30	Пемзовидное	42,5—46,5	37—40	5—7,5	≤ 5	3—8	0,5—3	—	1,7	0,15
АН-28	То же	5—10	≤ 1	5—15	36—45	35—44	≤ 2	1—2K_2O	2	0,08
48-ОФ-6	»	≤ 4	≤ 0,3	45—60	20—27	16—23	≤ 3	—	1,5	0,04P 0,05S
АН-25	Стекловидное	6—9	≤ 0,5	33—40	≤ 2	12—15	2—4	35—40 TiO_2	1,0	—
АН-27	Пемзовидное	7—10	—	6—9	40—45	33—40	—	4—6 Cr_2O_3	2,0	0,08
АН-70	То же	≤ 8	—	20—30	30—40	25—35	—	1—3 NaF	1,0	0,05P 0,09S
48-ОФ-10	»	9—12	—	35—46	28—34	≤ 8	—	—	1,5	0,04

Сварочные флюсы марок АН-348А, АН-348АМ, ОСЦ-45 и ОСЦ-45М применяют для наплавки преимущественно в сочетании с углеродистой, а иногда и с низколегированной проволокой. Недостатком этих флюсов применительно к наплавке является плохая отделимость шлаковой корки при нагреве детали свыше 400° С. Измельченную шлаковую корку можно добавлять к флюсу в количестве 20—25% по весу.

Флюс АН-20 используют в сочетании с низколегированной и высоколегированной проволокой. Шлаковая корка удовлетворительно отделяется при нагреве детали до 450° С. Флюс сравнительно легкоплавок и его трудно применять при наплавке деталей малых диаметров.

Флюс 48-ОФ-6 применяют в сочетании с высоколегированной проволокой. Шлаковая корка удовлетворительно отделяется при нагреве детали до 600—700° С.

Флюс АН-60 используют для наплавки на больших скоростях в сочетании с малоуглеродистой или низколегированной электродной проволокой, а также электродной лентой всех типов.

Флюс АН-26 применяется для наплавки аустенитных хромоникелевых сталей. Для наплавки чугунной лентой применяют флюсы АН-27 и АН-28. Флюс АН-27

позволяет легировать наплавленный металл хромом (0,7—1,5%). Для электрошлаковой наплавки применяют флюсы АНФ 1 и АН-25. Флюс АН-25 электропроводен в твердом состоянии и предназначен только для возбуждения электрошлакового процесса.

Состав флюсов-смесей приведен в табл. 17 [3]. Обычно наплавка с применением этих флюсов выполняется малоуглеродистой электродной проволокой.

17. Флюсы-смеси, применяемые для наплавки

Состав смеси	Типичный состав наплавленного металла в %				Примерная твердость *HB*
	C	Mn	Si	Al	
АНЛ-1 (93% флюса АН-10 и 7% алюминиевой лигатуры)	0,11	4,8	2,0	0.72	390
АНЛ-2 (93% флюса АН-20 и 7% алюминиевой лигатуры)	0,06	0,42	2.76	0.96	220

Алюминиевая лигатура содержит в среднем 80% Al и 20% Fe; она добавляется к флюсу в виде механической примеси, но грануляции соответствующей флюсу. Благодаря близости удельных весов лигатуры и флюса сепарация зерен при пересыпании не наблюдается. Тем не менее, наплавленный слой получается не вполне однородным ввиду несовершенства данного способа легирования. Более эффективны керамические флюсы (см. т. 2, стр. 134). При применении керамических флюсов наплавку обычно производят малоуглеродистой электродной проволокой марки Св-08 или Св-08А по ГОСТу 2246—60. Флюс марки АНК-18 [18] используется в сочетании с малоуглеродистой проволокой (табл. 18). Он пригоден для наплавки проволокой диаметром 1,6—6 *мм* на токе 200—750 *а*

18. Химический состав и твердость металла, наплавленного под керамическим флюсом АНК-18

Содержание примесей в %						Твердость *HRC*
C	Si	Mn	Cr	S	P	
				не более		
0.15 -0.25	0,2—0,4	1 - 1,8	3—5	0.04	0.03	35—45

(наплавка проволокой 3 *мм* и более может выполняться как на постоянном, так и на переменном токе, проволокой малых диаметров — только на постоянном токе).

Флюс АНК-18 содержит в %: 6—7 $CaCO_3$; 26—28 CaF_2; 26—30 MgO; 17—18 Al_2O_3; 7—11 SiO_2; 2—2,5 Na_2O и K_2O; 5,2—6,5 Cr; 2—2,5 Mn; 0,12—0,20 C; 0,2—0,3 Ti; 1,9—2,0 Al; 0,2—0,3 Si; 3,0—4,0 Fe.

Флюс АНК-18 применяют для наплавки опорных катков, натяжных колес и других деталей тракторов, роликов рольгангов, крановых колес и др.

Гранулированные порошки

Для индукционной и плазменной наплавки в качестве присадочного материала используют гранулированные порошки, изготовляемые путем распыления струи жидкого металла водой высокого давления. Гранулированные порошки

состоят из компактных зерен различных размеров. Порошок сплава сормайт (ГОСТ 11545—65) выпускается двух видов по гранулометрическому составу:

	Проходит через сито № 02	Остаток на сите № 04	Остаток на сите № 1,25
Крупный	20%	—	5%
Мелкий	30%	5%	—

Для плазменной наплавки производят сфероидизированные порошки как из сплава сормайт (ПГ-У30Х28Н4С4), так и из сплавов на основе никеля, содержащих Cr, B и Si (табл. 19).

19. Марки и состав гранулированных наплавочных порошков (РТУ УССР 1179 67)

Марка порошка	Химический состав в %							*Примерная* твердость наплавленного металла *HRC*
	C	Si	Mn	Cr	Ni	B	Fe	
ПГ-У30Х28Н4С4	2,5—3,3	2,8—4,2	≤ 1,5	25—31	3—5	—	Основа	48—54
ПГ-ХН80СР2	0,3—0,6	1,5—3,0	—	12—15	Основа	1,5—2,5	≤ 5	38—43
ПГ-ХН80СР3	0,4—0,8	2,5—4,5	—	12—16	То же	2—3	≤ 5	48—53
ПГ-ХН80СР4	0,6—1,0	3—5	—	13—17	»	2,5—4	≤ 5	57—62

Мелкие порошки (размеры зерен 40—100 *мк*) применяют для плазменной металлизации, а средние и крупные (соответственно 100—280 и 200—750 *мк*) для плазменной наплавки. Плазменная наплавка с присадкой порошка ПГ-ХН80СР2 производится без предварительного подогрева. При наплавке с

20. Литые присадочные прутки для газопламенной и аргоно-дуговой наплавки

Наименование или марка	Размеры в мм		Стандарт или технические условия	Химический состав в %	
	Диаметр	Длина		C	Si
Сормайт прутковый	6—7	400—450	ГОСТ 11545—65	2,5—3,3	2,8—3,5
Сплав ВХН-1	6—8	≥ 100	АМТУ 291—57	0,5—1,2	1,5—2,5
Сплав В2К	6—8	≥ 100	АМТУ 291—57	1,75—2,25	1,0—2,0
Сплав В3К	6—8	≥ 100	АМТУ 291—57	0,9—1,3	1,75—2,75

Наименование или марка	Химический состав в %					
	Mn	Cr	Ni	W	Co	Fe
Сормайт прутковый	≤ 1,5	25—31	3—5	—	—	Остальное
Сплав ВХН-1	≤ 0,5	35—40	50—60	—	—	≤ 5
Сплав В2К	—	28—32	≤ 2,0	14,0—17,0	48—53	≤ 3
Сплав В3К	—	28—32	≤ 2,0	4,0—5,0	58—63	≤ 3

присадкой порошков ПГ-ХН80СР3 и ПГ-ХН80СР4 для предупреждения трещин необходим предварительный подогрев соответственно до 320—380 и 380—420° С. Для индукционной наплавки выпускается порошок с неправильной формой частиц (сферические гранулы скатываются с изделия).

Прочие наплавочные материалы

При наплавке ацетилено-кислородным пламенем или аргоно-дуговым способом применяют присадочные прутки, обычно литые (табл. 20).

Для дуговой наплавки угольным или графитовым электродом присадочным материалом служат литые порошки, либо наплавочные смеси. Широко применяемая смесь «сталинит» приготовляется перемешиванием порошков феррохрома, ферромарганца и нефтяного кокса с чугунной стружкой. Другая известная смесь КБХ составляется из порошков феррохрома (50%), карбида хрома (5%), борида хрома (5%) и 40% железного порошка (табл. 21) Ввиду несовершенства

21. Примерный химический состав (суммарный) порошков и смесей, используемых при наплавке угольным электродом, и типичная твердость наплавленного металла

Наименование материала	Содержание примесей в %					Типичная твердость наплавленного металла *HRC*
	C	Si	Mn	Cr	Ni, B	
Сормайт (порошок)	3,0	3,5	1,0	28	4Ni	48
Сталинит М	8,5	2,0	7,0	25	—	52
Смесь КБХ	4,0	1,0	0,5	35	2B	56

данного метода легирования наплавленный металл получается заметно неоднородным по химическому составу, твердости и износостойкости. Однако для многих наплавляемых деталей эта неоднородность не имеет существенного значения и не препятствует успешному использованию наплавочных смесей как при наплавке угольным электродом, так и в качестве присадочного металла, расплавляемого малоуглеродистой стальной лентой под флюсом [42].

ПРОИЗВОДСТВО НАПЛАВОЧНЫХ РАБОТ

Выбор способа наплавки

Рациональный выбор способа наплавки определяется возможностью восстановления номинальных размеров и износостойкости детали, ее размерами и конфигурацией, допустимой величиной и характером износа, возможностью получения наплавленного слоя требуемого состава и свойств, а также экономичностью процесса Выбор способа наплавки часто зависит также от наличия соответствующего оборудования и материалов.

Ручная наплавка дает невысокую производительность, так как ведется с перерывами и на сравнительно малых токах. Качество сильно зависит от мастерства наплавщика. Наблюдаются заметные деформации деталей, вызванные неравномерным нагревом.

Высокой производительностью отличается индукционная наплавка токами высокой частоты. Однако для этого способа необходимо сравнительно сложное и дорогое оборудование. Способ экономичен в массовом производстве однотипных деталей: лемехов плугов, автомобильных деталей и т. п. Наплавка под флюсом незаменима, когда нужно создать износостойкий или кислотостойкий слой на поверхности крупногабаритных деталей больших сосудов, прокатных валков,

крупных валов, плунжеров и др. Однако под флюсом трудно осуществить наплавку деталей малых диаметров (менее 50 *мм*) с глубокими внутренними отверстиями, сложной формы и пр.

Вибродуговую наплавку целесообразно применять при восстановлении деталей малых диаметров (менее 50 *мм*), термообработанных деталей, наносить слои металла толщиной 0,3—1,0 *мм*.

Наплавка тел вращения малого диаметра, поверхности глубоких внутренних отверстий, деталей сложной формы успешно выполняется открытой дугой порошковой проволокой с внутренней защитой.

Выбор режима наплавки прежде всего зависит от величины износа детали. Для большей производительности важно работать на максимальной силе тока, но при этом должно быть обеспечено хорошее формирование наплавленного слоя. При определении силы тока необходимо учитывать диаметр наплавляемой детали, величину износа, глубину проплавления основного металла и мощность источника тока. Техника механизированной наплавки подробно рассмотрена в книге [45].

Восстановление наплавкой деталей тракторов, автомобилей и сельскохозяйственных машин

Опорные катки гусеничных тракторов. Катки восстанавливают преимущественно механизированной наплавкой под флюсом проволокой марки Нп-30ХГСА и др. диаметром 2 *мм* в сочетании с флюсом марки АН-20 или АН-348А. Наплавка производится на специализированных станках или на переоборудованных токарных станках. Типичный режим наплавки: $I_д$ = 240 ÷ 260 *а*, $U_д$ = 24 ÷ 26 *в*, $v_н$ (окружная) — 40 *м/ч*, шаг наплавки 4 *мм/об*, смещение электрода с зенита 10—12 *мм*. Предварительный подогрев не применяется. Наплавленные катки обычно устанавливают на тракторы без механической обработки. Имеется положительный опыт наплавки катков трактора ДТ-54 электродной лентой [54]. Производительность наплавки в этом случае в 3—3,5 раза выше, чем при наплавке проволокой.

Натяжные колеса гусеничных тракторов (ленивцы). При наплавке под флюсом применяют проволоку марки Нп-30ХГСА или Нп-2Х13 диаметром 3 *мм* и флюс АН-20 или АН-348А. Режим наплавки: $I_д$ = 280 ÷ 290 *а*, $U_д$ = 25 ÷ 27 *в*, $v_н$ (окружная) = 36 *м/ч*, шаг наплавки 5 *мм/об*, смещение электрода с зенита 40—50 *мм*. Механическая обработка наплавленных деталей обычно не производится.

Беговые дорожки звеньев гусениц. Звенья гусениц трактора С-80 изготовляют из стали 45 и закаливают на твердость *НВ* 321—418. Беговые дорожки изношенных звеньев гусениц наплавляют проволокой Нп-30ХГСА под флюсом АН-348А, твердость наплавленного металла около *НВ* 330. Режим наплавки: $I_д$ = 240 ÷ 260 *а*, $U_д$ = 34 ÷ 36 *в*, $v_н$ = 12 ÷ 14 *м/ч*. Применяется также наплавка проволокой Св-08 под флюсом АНЛ-1, твердость наплавленного металла около *НВ* 400. Более производительна наплавка электродной лентой. Наплавка чугунной лентой производится под флюсом АН-28. Для ленты размером 0,7 ÷ 50 *мм* рекомендуется следующий режим наплавки: $I_д$ = 600 *а*, $U_д$ = 20 ÷ 22 *в*, $v_н$ = 8 *м/ч*. Толщина наплавленного слоя отбеленного чугуна составляет 3—3,5 *мм*, твердость *HRC* 40—50.

Восстановление проушин звеньев гусеничных машин. Звенья гусеничных тракторов и других машин изготовляют из стали Г13, иногда из углеродистых или низколегированных сталей. Проушины восстанавливают путем наплавки лежачим электродом со специальным покрытием [2]. Применяют электроды со стержнем в виде изогнутой в желобок пластины (см. рис. 14) (электроды АНП-3) или электроды с круглым стержнем и покрытием специальной формы (электроды АНП-4). Два электрода АНП-4 приклеивают к металлической подкладке при влажном состоянии массы и вместе с ней прокаливают (рис. 26).

Стержни и подкладки изготовляют из мягкой малоуглеродистой стали марок

05кп, 08кп или 08 по ГОСТу 1050—60*. В зависимости от типа звеньев и величины износа размеры стержней различны.

При наплавке звеньев из стали Г13 применяют интенсивное охлаждение водой и для уменьшения проплавления устанавливают прокладки. Электрод закрепляется в держателе и вводится через все проушины звена (рис. 27). С противоположной стороны держателя угольным электродом возбуждают дугу. По

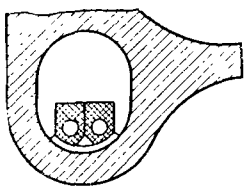


Рис. 26. Сечение проушины с уложенным электродом АНН-4

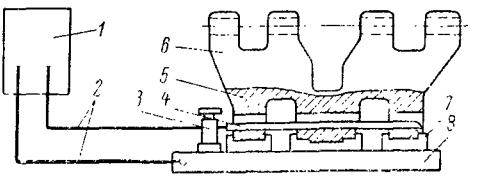


Рис. 27. Схема наплавки проушин звена гусеницы лежачим электродом: *1* — источник питания; *2* — провода; *3* — электрододержатель; *4* — электрод; *5* — проушина; *6* — звено; *7* — медные башмаки; *8* — станина

окончании наплавки одной проушины электрод резким движением перемещают в следующую проушину. Дуга при этом не обрывается. Режимы наплавки приведены в табл. 22.

22. Режимы наплавки проушин лежачим электродом

Тип электрода	Размеры в *мм*		Ток в *а*	Напряжение дуги в *в*
	сердечника	подкладки		
АНН-3	2,5×14	2×14	280—300	30—40
АНН-4	⌀ 5×2	2×14	260—270	35—45

Наплавку выполняют на переменном токе. Специальная наплавочная установка У-203 позволяет механизировать процесс. Производительность установки — 75 звеньев в смену. Стойкость восстановленных звеньев не уступает новым, а стоимость составляет не более 50% нового звена.

Коленчатые валы автомобильных двигателей. Трудность восстановления коленчатых валов заключается в том, что необходимо одновременно решить несколько задач: восстановить размеры шеек и их износостойкость, обеспечить высокую усталостную прочность вала и хорошие условия службы сопряженных деталей. Предложен ряд способов восстановления коленчатых валов, однако пока ни один из них нельзя признать полностью отвечающим всем требованиям.

Наплавка валов проволокой Нп-30ХГСА под флюсом АП-348А по технологии, разработанной в Саратовском политехническом институте [28], заключается в следующем. Масляные каналы закрывают настой, состоящей из 86% песка, 4% огнеупорной глины, 2% раствора NaOH и 8% растворимого стекла. Шейки наплавляют от галтели к середине. Режим наплавки: $I_д$ = 160 ÷ 180 *а*, $U_д$ = = 27 ÷ 30 *в*, вращение вала 2,5 *об/мин*, шаг 3—3,5 *мм*, смещение электрода с зенита 6—8 *мм*, питание дуги от источника постоянного тока обратной полярности. После наплавки валы подвергают нормализации (880—900° С) и правке (биение не более 0,2 *мм*).

Изношенную шейку под шестерню, отверстие под подшипник и места износа по фланцу наплавляют проволокой Св 08ГСА в среде углекислого газа. После

23. Технологические данные по наплавке под флюсом деталей автомобилей

Наименование деталей	Деталь		Электродная проволока			Режим наплавки			Шаг в мм/об	Смещение с зенита в мм	Твердость HB	
	Место наплавки	Материал (марка стали)	Марка	Диаметр в мм	Расход в г	I_0 в а	U_0 в в	Число оборотов шпинделя в минуту			после наплавки	после термообработки
Тормозной вал	Шейки под подшипник	35	Нп-40; Нп-50	1,2	105	120–140	25–27	2,5	4,2	3–5	160–180	–
Полуось и шлицевой конец карданного вала	Шлицы	40Х	Нп-30ХГСА	2	540	250–270	26–28	–	–	–	280–300	350–380
Кулак разжимной передний	Шейки под подшипники	45	Нп-40; Нп-50	1,2	105	120–140	25–27	2,5	4,2	3,5	180–190	HRC 40
Кулак разжимной задний	То же	40	Нп-40; Нп-50	1,2	230	120–140	25–27	2,5	4,2	3,5	180–190	HRC 45
Фланец вала ведущей конической шестерни	Шейка под сальник	45	Нп-40; Нп-50	1,2	110	85–95	29–32	1,6	3,5	4–5	–	HRC 42
Фланец ведомого вала и вилка скользящая карданного вала	Шейки	45	Св-08	1,2	90	95–110	30–32	1,7	3,4	8–10	180–200	–
Валы наружный и промежуточный	Сварка вилки с трубой	40Х	Св-08	2,0	100	220–270	30–32	1,7	–	5–8	–	–
Вал распределительный	Резьбовая шейка	45	Св-08	1,0	15	75–80	36–38	4	3,4	3,4	180–200	–
Вал рулевой сошки	То же	40Х	Св-08	1,0	30	75–80	36–38	4	3,4	3,4	270–290	–
Поперечная рулевая тяга	Резьбовая шейка	20	Св-08	1,2	100	75–80	36–38	4	3,4	3,4	–	–
Вилка скользящая карданного вала	Шлицы	30Х	Нп-40	1,2	130	85–90	36–38	4,0	4,0	5,0	210–220	
Полуось заднего моста		35ХГС	Нп-30ХГСА	1,6	620	170–190	34–36				–	

механической обработки шейки закаливают т.в.ч. на твердость *HRC* 48—50. Затем вал повторно правят с точностью до 0,1 *мм* и шейки шлифуют.

Наплавка валов пружинной проволокой II класса по ГОСТу 9389—60* диаметром 1,8 *мм* под флюсом АН-348А разработана в институте КазНИПИАТ [10]. Режим наплавки: $I_д$ = 280 ÷ 220 *а*, $U_д$ = 26 ÷ 30 *в*, вращение детали 1,8—2 *об/мин*, шаг 4—6 *мм/об*, смещение электрода с зенита 5—10 *мм*. При наплавке галтелей электрод устанавливают под углом 45° и строго в зените.

Наплавленные валы подвергают отпуску: нагрев до 650° С со скоростью 400 *град/ч*, выдержка 90 *мин* и охлаждение на спокойном воздухе. Далее шейки

24. Технологические данные по вибродуговой наплавке деталей автомобилей

Наименование деталей	Электродная проволока		Режим наплавки							
	Марка	Диаметр в *мм*	Напряжение в *в*	Число витков РСТ-34	Число оборотов детали в минуту	Подача проволоки в *м/мин*	Шаг в *мм/об*	Расход жидкости в *л/мин*	Твердость *HRC*
Автомобиль ЗИЛ-150									
Толкатель клапана	Пружинная II класса	1,6	12	4	25	1,2	1,1	0,5	39—54
Вал распределительный	То же	1,8	12—13	5	3,5	1,0	3	0,5	45—56
Ось педали сцепления	»	1,6	12—14	5	10	1,3	2,2	0,5	40—50
Вал ведущий коробки передач	»	1,6	12—13	5	8	1,3	3,0	0,5	45—50
Вал промежуточной коробки передач	»	1,8	12—13	6	4	1,0	3,0	0,5	45—56
Фланец вилки кардана	Св-08	1,4	17—18	13	8	1,4	2,4	0,2	*НВ* 180—200
Крестовина кардана	Пружинная II класса	1,8	12—13	5	9	1,0	2,6	0,6	45—56
Вилка скользящая кардана	Св-08	1,4	17—18	5	8	1,4	2,4	0,2	*НВ* 180—200
Крестовина дифференциала	Пружинная II класса	1,8	14	5	6	1,0	2,8	0,5	45—56
Кулак разжимной переднего тормоза и заднего тормоза	То же	1,8	14	5	6	1,0	1,8	0,4	44—50
Ось колодок тормоза	»	1,6	12—14	6	9	1,3	2,4	0,5	45—56
Автомобиль М-20									
Ступица заднего колеса	Пружинная II класса	1,8	18—14	5	4,5	1,0	3,0	0,7	46—56
Распределительный вал, фланцы кардана и ведомого вала коробки передач	То же	1,6	12	6	4,5	1,3	2,8	0,7	46—56
	»	1,6	12	6	5	1,3	2,2	0,5	39—54
Ведомый вал коробки передач	»	1,6	12	5	10	1,3	2,2	0,4	39—54
Крестовина кардана	»	1,6	12	5	12	1,3	2,5	0,5	44—56
Крестовина дифференциала	»	1,6	12	5	12	1,3	2,5	0,6	44—56

Примечание. Проволока Св-08 поставляется по ГОСТу 2246—60, а проволока пружинная II класса — по ГОСТу 9389—60.

закаливают т.в.ч., шлифуют и полируют до 10-го класса чистоты. Глубина закаленного слоя около 5 *мм*, твердость *HRC* 56—60.

Восстановление коленчатых валов с закалкой шеек т.в.ч. требует специального оборудования, которое может быть эффективно использовано в условиях централизованного ремонта.

Разработана также технология восстановления валов без закалки шеек [36]. Твердость металла после наплавки *HRC* 50—60. Наплавка выполняется проволокой Нп-30ХГСА или Св-18ХГСА диаметром 1,6—1,8 *мм* под флюсом АН-348А с присадкой легирующих материалов.

Для приготовления легирующего флюса в смеситель помещают 50 *кг* стандартного флюса АН-348А, 1 *кг* серебристого графита, 1 *кг* порошкообразного феррохрома марки ФХ400 или ФХ650 или 1,5 *кг* шихты сталинита. После 2—3 *мин* перемешивания сухой смеси добавляют 1 *л* растворимого стекла (плотность 1,3—1,4) и продолжают перемешивание еще в течение 2—3 *мин*. Затем смесь помещают на противень слоем высотой 50—70 *мм*, дают просохнуть 5—6 *ч* на воздухе и прокаливают 1,5—2 *ч* в печи при 350—400° С. После прокалки легирующий флюс измельчают и просеивают через сито 10 *отв/см*^{2}.

Вначале наплавляют шатунные шейки валов, а затем коренные, последовательность наплавки не оказывает влияния на деформацию вала. Галтели наплавляют кольцевым валиком при выключенном суппорте станка, а остальную часть шеек по винтовой линии. При наплавке галтелей электрод наклоняют под углом 60—65°. Режим наплавки: $I_д$ = 170÷180 *а*, $U_д$ = 24 ÷ 26 *в*, вращение вала 3 *об/мин*, шаг 4 *мм/об*, смещение электрода с зенита 5—7 *мм*.

Опыт показывает, что средняя долговечность наплавленных валов значительно меньше, чем новых, особенно, если восстановление произведено по последнему способу.

Различные детали автомобилей. Технологические данные по наплавке под флюсом ряда деталей автомобилей приведены в табл. 23, по вибродуговой наплавке — в табл. 24.

Наплавка деталей землеройных, дорожных и строительных машин

Зубья ковшей экскаваторов. Наплавляют как новые зубья, так и изношенные. При ручной наплавке применяют электроды Т-590, Т-620, ВСН-6 и др. Толщина наплавленного слоя должна составлять не менее 2—3 *мм*.

При полуавтоматической наплавке применяется порошковая электродная проволока марки ПП-У25Х17Т-0 диаметром 2,8—3 *мм*. Режим наплавки: $I_д$ = 240 ÷ 260 *а*, $U_д$ = 24 ÷ 26 *в*. Производительность 3—5 *кг/ч* наплавленного металла. Наплавляют поверхности зубьев по длине около 200 *мм* и боковые грани 60—80 *мм* в виде решетки. Стойкость зубьев повышается в среднем в 3 раза. Начали применять электрошлаковую наплавку [49].

Лемехи плугов. Лемехи изготовляют из стали марки Л53 и Л65. Термическую обработку лемехов производят на твердость *НВ* 500—550.

Широко распространена наплавка лемехов сплавом сормайт токами высокой частоты [40]. Шихта, содержащая порошок сормайта и флюса (табл. 25).

25. Наплавочные смеси для наплавки лемехов т.в.ч.

Тип порошка износостойкого сплава	Содержание в смеси в % (по весу)				
	Сормайт	Борный ангидрид	Бура	Силикокальций	Флюс АН-348А
Гранулированный	85	3	3	1,5	2,3
Дробленый	88	6	3	3	3,4

дозированным слоем помещается в паз, предварительно профрезерованный вдоль лезвия. Для расплавления шихты лемех помещают в специальный индуктор. Время наплавки одного лемеха в зависимости от мощности высокочастотного генератора составляет 50—90 *сек*.

Для обеспечения самозатачивания толщина наплавленного слоя должна составлять 1,7 ± 0,3 *мм*. После наплавки производят нормализацию (800 ± 20° С) и для лучшей прирабатываемости заточку под углом 20—25° до обнаружения кромки наплавленного металла.

Наплавка деталей дробильно-размольного и горнорудного оборудования

Детали горнорудного оборудования работают в условиях интенсивного абразивного износа и быстро выходят из строя. Номенклатура восстанавливаемых деталей включает многие десятки наименований. Применяют как наплавку штучными электродами, так и механизированные способы наплавки.

Ковши многоковшовых экскаваторов. Наплавлять необходимо рабочие кромки режущих поясов (ножей) ковшей (рис. 28). Применяется порошковая проволока ПП-У25Х17Т-0. Для удобства работы ковш закрепляют на планшайбе манипулятора или простейшего кантователя. Режим наплавки: $I_д$ = = 380 ÷ 400 *а*, $U_д$ = 28 ÷ 30 *в*, $v_н$ = 12 ÷ 18 *м/ч*. Твердость наплавленного слоя *HRC* 49—52.

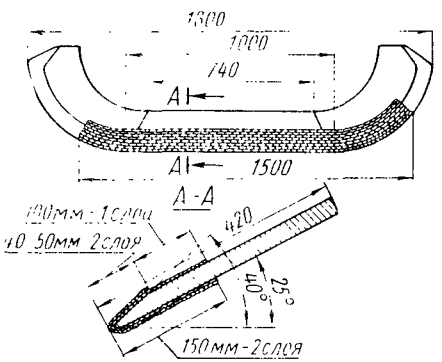


Рис. 28. Схема механизированной наплавки ножей экскаваторов Д-1500 и ДС-1500

Звенья ковшовых цепей экскаваторов. Звенья изготовляют из стали 40Г2 или 45Г2. Наплавлять необходимо горизонтальные участки звеньев, овальный участок промежуточного звена и боковые участки (щековины). Трещины в наплавленном слое недопустимы.

Горизонтальные участки наплавляют под флюсом на специальной установке. Применяют ленту из малоуглеродистой стали размером 0,8—70 *мм* в сочетании с флюсом АН-60. Режим наплавки: $I_д$ = 1900 ÷ 2000 *а*, $U_д$ = 82 ÷ 32 *в*, $v_н$ = 15 *м/ч*. Толщина слоя, наплавляемого за один проход, 8 *мм*, твердость *HRC* 28—30.

Овальный участок промежуточного звена и щековины наплавляют порошковой электродной проволокой ПП-50Х5ФТ-0. Режим наплавки: $I_д$ = 400 ÷ 430 *а*, $U_д$ = 26 ÷ 28 *в*. Твердость наплавленного слоя *HRC* 57—59. Наплавка производится без предварительного подогрева.

Била молотковых мельниц. Била изготовляют из стали марки 35. Применяется наплавка штучными электродами Т-590 или Т-620 и полуавтоматическая наплавка порошковой проволокой. Износостойкий слой толщиной 30—40 *мм* наплавляют полуавтоматом при питании дуги от источника с жесткой внешней характеристикой. Используют порошковую проволоку марки ПП-У30Х14МСФ-0 диаметром 2,8—3,0 *мм*. Рекомендуемый режим наплавки: $I_д$ = 250 ÷ 300 *а*, $U_д$ = 20 ÷ 22 *в*, $v_{под}$ = 100 *м/ч*.

Износостойкость наплавленного слоя в 1,5—2 раза выше, чем износостойкость литых бил из высокомарганцовистой стали Г13. Возможно восстановление изношенных бил повторной наплавкой.

Черпаки драг. Черпаки драг отливают обычно из стали Г13Л со сменным козырьком. Наплавку рабочей кромки производят полуавтоматом порошковой проволокой диаметром 2,8 *мм*. Наилучшие результаты дает проволока марки

ПП-У30Х14МСФ-О. Наплавленный металл такого типа изнашивается в 5—6 раз медленнее, чем сталь Г13Л. Выкрашивание не наблюдается. Первый слой наплавляют на токе 250—300 *а*, наплавку ведут с поперечными колебаниями, сразу на всю ширину кромки черпака. Второй и третий слои наплавляют на токе 350—425 *а*. Общая толщина наплавленного слоя 10—12 *мм*.

Наплавка железнодорожных рельсов и крестовин

Рельсы изготовляют из углеродистых сталей (0,69—0,82% С), содержание марганца в рельсовой стали составляет 0,6—1,0%. При наплавке таких сталей возможно образование трещин. Наплавка в путевых условиях производится без подогрева. Для ручной наплавки применяют электроды марки ОЗН-300 или К-2-55. Наплавленные валики можно накладывать вдоль головки рельса, поперек или под углом 40—45°. Наименьшие напряжения наблюдаются при диагональном способе наплавки, хотя он и наиболее трудоемок. При температуре ниже +5° С наплавлять концы рельсов не рекомендуется, так как возможно образование трещин.

Допускается наплавка крестовин со следующим максимальным износом: а) усовики и литые сердечники сборных крестовин на станционных путях с интенсивным движением — 6 *мм*; б) то же на прочих путях — 10 *мм*; в) сердечники сборно-рельсовых крестовин на главных путях — 4 *мм*; в) то же на прочих путях — 8 *мм*.

Для наплавки крестовин из углеродистых сталей применяют электроды ОЗН-300 или К-2-55. Наплавка в путевых условиях допускается только в летнее время. Крестовины, имеющие развитые трещины, а также литейные дефекты, наплавлять нельзя. Для предупреждения возникновения значительных внутренних напряжений крестовины не рекомендуется наплавлять непрерывным наложением валиков. Для наплавки литых крестовин из высокомарганцевой аустенитной стали Г13 применяют электроды марки ОМГ-Н. Для минимального нагрева основного металла наплавку выполняют на следующем токе: электроды диаметром 4 *мм* — 130—150 *а* и диаметром 5 *мм* — 170—190 *а*. Более благоприятные условия наплавки создаются зимой. Рекомендуется производить наплавку отдельными валиками с разбросом по элементам крестовин: сердечник — усовик — сердечник и т. д. Ширина валиков не должна превышать 12—15 *мм* [7].

Восстановление наплавкой изношенных деталей подвижного состава железнодорожного транспорта

Бандажи вагонных и локомотивных колес. Бандажи изготовляют из сталей, содержащих 0,6—0,8% углерода. Наплавка на такую сталь связана с опасностью образования трещин. Применяют способ наплавки двумя последовательно расположенными дугами, который позволяет предупредить образование трещин в наплавленном слое без предварительного подогрева. На переднюю дугу подается малый ток и она проплавляет основной металл на минимальную глубину, вторая дуга, более мощная, переплавляет металл, наплавленный первой дугой, и не увеличивает проплавление основного металла. Этим достигается малый переход углерода из основного металла в наплавленный слой [4]. Наплавку производят проволокой марок Св 08Г, Св-08ГА и Св-10Г2 диаметром 2 *мм* в сочетании с флюсом АН-348А или ОСЦ-45. Твердость наплавленного металла составляет *НВ* 200—250. Колесную пару устанавливают вертикально. Наплавку выполняют самоходным двухдуговым наплавочным аппаратом А-482 или на наплавочной установке Р-643.

Режим наплавки приведен в табл. 26.

Ступицы. Наплавку производят проволокой Св-08 или Св-08Г диаметром 2 *мм* под флюсом АН-348А или ОСЦ-45. Режим наплавки: $I_д = 250 \div 270$ *а*, $U_д = 30 \div 34$ *в*, $v_н = 25$ *м/ч*, шаг 5 *мм*.

26. Режим двухдуговой наплавки гребней бандажей

Показатели	Значения параметров	
	1-я дуга	2-я дуга
Скорость подачи электродной проволоки в *м/ч*	124	205
Сила тока в *а*	180—200	280—300
Напряжение дуги в *в*	34—38	34—38
Скорость наплавки в *м/ч*	24	—
Вылет электрода в *мм*	22—24	22—24
Расстояние между электродами в *мм*:		
продольное	50	—
поперечное	3—4	—

Корпус автосцепки. Восстанавливать необходимо большой и малый зуб, а также хвостовик. Наплавку производят под флюс м АН-348А легированной проволокой. Для повышения производительности используют многоэлектродную наплавку. Наиболее эффективно применение шестиэлектродной наплавки проволокой диаметром 3 *мм*. При питании переменным током рекомендуется следующий режим наплавки: $I_д = 600 \div 700$ *а*, $U_д = 45 \div 50$ *в*, $v_н = 12$ *м/ч*. Указанный режим дает возможность за один проход наплавить валик высотой 5,4—5,8 *мм*, шириной 34—36 *мм* [19]. Многоэлектродная наплавка под флюсом дает чистую и ровную поверхность, не требующую станочной обработки, нужна лишь небольшая абразивная зачистка.

В качестве электродов используют проволоку марок Нп-30ХГСА и Нп-2Х14 в сочетании со сварочной проволокой Св-08. Если твердость наплавленного слоя находится в пределах *НВ* 350—400, то, как показали эксплуатационные испытания, долговечность деталей автосцепки увеличивается в 2 раза по сравнению с ненаплавленными деталями или наплавленными вручную сварочными электродами.

Различные детали подвижного состава. Вибродуговой наплавкой в среде жидкости восстанавливают такие детали, как валы вентиляторов, валы муфты сцепления, валики рессорного подвешивания тепловозов и др., а вибродуговой наплавкой под флюсом — валы тяговых двигателей тепловозов, турбовоздуходувки, распределительные валы дизелей и др. Толщина наплавленного слоя составляет 0,7—1,2 *мм*. Применяют проволоку Св-08 или Св-10Г2 и флюс АН-348А или ОСЦ-45 (табл. 27).

27. Режимы вибродуговой наплавки под флюсом

Параметры режима	Диаметр электрода в *мм*	
	1,2	1,6
Ток в *а*	80—100	90—120
Напряжение дуги в *в*	34—36	28—30
Подача электрода в *м/ч*	84	68
Частота вибрации электрода в *1/сек*	20—50	20—50
Амплитуда колебаний в *мм*	1—2	1—1,5
Скорость наплавки в *м/ч*	28	28
Шаг в *мм*	3	3

Наплавка деталей металлургического оборудования

Наплавке подвергают литые и кованые валки из углеродистых сталей 45, 50, 55 и др., а также из низколегированных сталей 50Х2, 60ХГ, 50ХН и др. Износостойкий слой наплавляют на рабочие поверхности новых валков до уста-

новки в стан. Широко практикуется многократная повторная наплавка валков после работы в клети.

Валки трубопрокатных станов. Наплавляют калибры валков. Место наплавки протачивают на глубину 5 *мм*. Чаще всего применяют порошковую проволоку марки ПП-3Х2В8 диаметром 3,6 *мм* и флюс АН-20. Для трубопрокатных валков, в большой мере подверженных растрескиванию и выкрашиванию, рекомендуется порошковая проволока марки ПП-25Х5МФС в сочетании с флюсом АН-20. Примерный режим наплавки: $I_0 = 280 \div 310$ *а*, $U_0 = 28 \div 30$ *в*, $v_н$ (окружная) $= 36 \div 42$ *м/ч*, шаг 6—8 *мм/об*. Для предупреждения трещин валок подогревают индуктором до 370° С. После наплавки его прогревают при этой же температуре в течение 20—40 *мин* и затем охлаждают в утепленном коробе.

Валки пилигримовых станов. Наплавка осуществляется на специализированном станке с программным управлением типа Р-754 или КЖ-50. Применяют проволоку марки Св-08Х20Н10Г6 или Св-08Х20Н9Г7Т и флюс АН-20. Твердость металла после наплавки *НВ* 201—227 и после наклепа *НВ* 244—272. Стойкость валков повышается в 3—5 раз по сравнению с изготовлением из стали 40ХНМ.

Валки сортопрокатных станов. Наплавка производится как с целью восстановления размеров, без увеличения долговечности, так и для максимального увеличения износостойкости. В первом случае целесообразна наплавка дешевым металлом, одинаковой стойкости со сталью валка. Такие же требования предъявляются, когда требуется изменение калибровки, исправление ошибок обработки и т. п. Для восстановительной наплавки обычно применяют проволоку марки Нп-20ХГСА. При износостойкой наплавке марку наплавочной проволоки выбирают в зависимости от условий службы валка. Некоторые данные о режиме наплавки и свойствах наплавленного металла приведены в табл. 28.

28 Характеристики наплавленного металла при наплавке сортопрокатных валков

Марка проволоки	Температура подогрева валка в °С	Твердость *HRC* при	
		20° С	600° С
Нп-20ХГСА	250—350	24—30	18—20
ПП-3Х2В8	340—360	44—52	38—42
ПП-4Х4ВЗФ	350—400	38—45	24—28
ПП-25Х5ФМС	330—380	40—46	26—30

Предварительный подогрев валков необходим для предупреждения трещин, снижения внутренних напряжений и для получения оптимальной структуры наплавленного металла. Наиболее удобен индукционный нагрев током промышленной частоты. Применяют также газопламенный нагрев с помощью беспламенных или обычных горелок. Массивные валки диаметром свыше 650 *мм* целесообразно медленно нагревать в печи.

При наплавке кругового калибра ось вращения валка должна поворачиваться, чтобы наплавленный валик был всегда в нижней точке (рис. 29). Наплавку валков весом более 8 *т* производят при горизонтальной оси вращения. Для предупреждения стекания наплавленного металла и улучшения формирования наматывают асбестовый шнур (рис. 30). Наиболее эффективно использование этого приема в сочетании с движением аппарата по копиру.

Замедленное охлаждение наплавленных валков очень важно для предупреждения трещин и поломок, вызванных внутренними напряжениями. Валки диаметром менее 650 *мм* охлаждают под утепленным коробом. Тяжелые валки после наплавки помещают в печь, где производят отпуск при 520—540° С для снятия напряжений и охлаждают вместе с печью.

В результате наплавки валков порошковой проволокой марок ПП-3Х2В8, ПП-25Х5МФС или ПП-4Х4ВЗФ их стойкость повышается в среднем в 5 раз по сравнению с коваными валками из стали 55.

Валки листопрокатных и штрипсовых станов. Наплавке подвергают большей частью валки черновых клетей, используя переоборудованные вальцетокарные станки с наплавочными аппаратами, укрепленными на суппорте. Максимальная

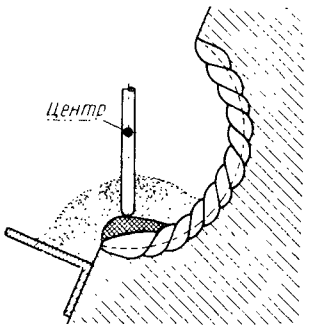


Рис. 29. Схема наплавки кругового калибра прокатного валка

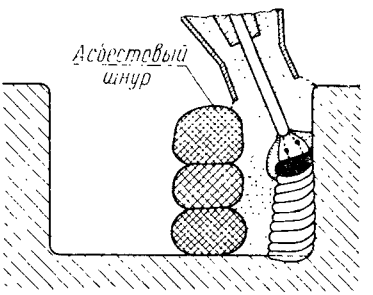


Рис. 30. Схема наплавки стенки ящичного калибра прокатного валка при горизонтальной оси вращения валка

производительность наплавки под флюсом достигается при многодуговой схеме, когда работают одновременно несколько наплавочных аппаратов, каждый из которых наплавляет определенный участок поверхности.

29. Рекомендуемые условия наплавки и термической обработки штампов

Наименование инструмента и материал	Марка электродов	Число слоев наплавки	Температура подогрева в °С	Режимы термообработки в °С			Твердость HRC
				Отжиг	Закалка	Отпуск	
Пуансоны и матрицы для холодной обрезки, просечки и пр. из сталей 5ХНТ, 7ХЗ, У8, У10 и др.	ЭН-60М	2—5	300—400	— 740—860	— 790—900	200—400 —	50—56 50—58
То же из сталей Х12Ф1, 3Х2В8, 4Х5В2 и др.	ЭН-60М ОЗИ-1	3—4 2—3	650—760	— 730—900	— 1300—1280	400—650 —	48—54 56—60
Пуансоны и матрицы для горячей обрезки и прошивки из сталей 5ХНТ, 7ХЗ, У8, У10 и др.	ЭН-60М	2—5	300—400	— 740—860	— 790—960	200—400 —	50—56 50—58
Прошивные и калибрующие пуансоны, матрицы для горячего прессования, работающие при температуре выше 400° С из сталей 5ХНТ, 5ХНВ, 3Х2В8 и др.	ОЗИ-1	1—3	400—700	— 730—900	— 1000—1280	500 —	60 56—60

Примечание. Механическая обработка после наплавки абразивом и режущим инструментом.

Для наплавки листопрокатных и штрипсовых валков используют порошковую проволоку марки ПП-3Х2В8 в сочетании с флюсом АН 20. Наплавку ведут с подогревом валка до 400° С и последующим замедленным охлаждением.

Валки блюмингов. Подготовка валка к наплавке заключается в обточке с возможно более полным удалением трещин. Нагрев валков перед наплавкой до 400° С производят в печи или с помощью индукторов, смонтированных на специальном стенде. Важно достигнуть сквозного прогрева, ввиду чего нагрев длится не менее 24 *ч* [51]. Выемки, образовавшиеся при удалении глубоких трещин, заплавляют сварочной проволокой Св-08 под флюсом АН-348А. Затем основную массу слоя наплавляют проволокой Нп-30ХГСА под тем же флюсом. Наиболее нагруженные первый, иногда также второй калибр, наплавляют износостойкой сталью с таким расчетом, чтобы толщина рабочего слоя составила 10—12 *мм*. Для этого слоя применяют проволоку марки ПП-4Х4В3Ф либо ПП-25Х5ФМС. Поверхностный слой 5—7 *мм* наплавляют снова проволокой 30ХГСА и по нему после обточки делают насечку или рифленую накатку. Такой порядок наплавки облегчает механическую обработку наплавленных валков и обеспечивает необходимую для хорошего захвата шероховатость поверхности валка.

В процессе наплавки температура валка должна быть не ниже 350° С. По окончании наплавки валок снова помещают в печь и производят отпуск для снятия напряжений при 520—540° С, с последующим медленным охлаждением.

Наплавка дала возможность изготовлять валки блюминга из стали 50 и при этом увеличить продолжительность непрерывной работы стана до 28—32 суток.

Детали засыпного аппарата доменной печи. Наиболее распространена механизированная наплавка под флюсом. Чтобы исключить стекание расплавленного металла, конусы наплавляют на специальной установке, обеспечивающей удобное расположение наплавляемого изделия. Наплавочный аппарат перемещается вдоль образующей конуса, и наплавленный валик располагается по винтовой линии.

Поскольку деталь очень громоздкая (конус современной домны весит 15—20 *т* и более), а наплавить нужно более 1 *т* износостойкого металла, подогрев обычно не применяется. Место примыкания конуса к чаше шириной 300—350 *мм* наплавляют порошковой проволокой марки ПП-3Х2В8, а остальную поверхность так: нижние три слоя — проволокой ПП-Х12ВФ и верхние два слоя — проволокой ПП-Х10В14. Общая толщина наплавленного слоя около 15 *мм*. При описанном порядке наплавки трещины, неизбежно возникающие при наплавке толстого слоя высокоуглеродистого металла без подогрева, располагаются вдоль образующей конуса. Направление трещин совпадает с направлением газового потока, несущего абразивные частицы, и они становятся очагами эрозионного разрушения наплавленного слоя.

Иная картина получается, если произвести наплавку так, чтобы наплавленные валики располагались вдоль образующей, а трещины — перпендикулярно газовому потоку. Наплавка уплотнительной поверхности в этом случае выполняется с возвратно-поступательным движением электрода и наплавленные валики располагаются вдоль образующей, создавая кольцевую полосу шириной 350 *мм* (рис. 31). Наплавка производится открытой дугой, порошковой лентой марки ПЛ-300Х25Н3С3.

На чаше таким же способом получают контактный пояс шириной 150—200 *мм*, остальную поверхность наплавляют кольцевыми валиками при горизонтальном расположении образующей наплавленной поверхности.

Ножи пресс-ножниц блюминга и слябинга. Рабочие кромки наплавляют проволокой ПП-3Х2В8 под флюсом АН-20. Предварительно по месту наплавки строгают паз шириной 40 *мм* и глубиной 4 *мм*. Предварительный подогрев производят в печи до 450—470° С. Наплавляют три слоя металла. После наплавки деталь помещают в печь при 400—450° С, выдерживают при этой температуре 2—2,5 *ч* и охлаждают с печью до 60° С. Твердость наплавленного слоя *HRC*

50—53. Стойкость ножей увеличивается в 4 раза по сравнению с наплавкой сормайтом.

Прессовый инструмент. Особенно быстро изнашивающимися деталями являются рабочие втулки контейнеров, матрицы, пресс-шайбы и пресс-штемпели.

Внутренние поверхности рабочих втулок наплавляют с предварительным подогревом до 300—350° С порошковой проволокой марки ПП-2Х4В3Ф-0 или ПП-25Х5МФС-0 с внутренней защитой. После наплавки втулки нагревают в печи до 350—400° С, выдерживают при этой температуре в течение 16—24 *ч* и охлаждают с печью. Твердость наплавленного слоя *HRC* 40—46. Стойкость наплавленных втулок при прессовании меди и ее сплавов в 3—4 раза выше по сравнению со втулками, изготовленными из стали 4ХНВ.

Для восстановления втулок по наружному диаметру и наплавки матриц применяют проволоку Нп-30ХГСА и флюс АН-20. Матрицы диаметром 35 *мм* и менее восстанавливают электрошлаковым способом, заплавляя отверстие полностью. Наружные поверхности пресс-шайб и пресс-штемпелей наплавляют проволокой ПП-3Х2В8 под флюсом АН-20.

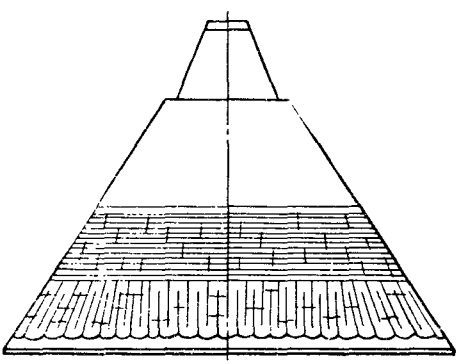


Рис. 31. Наплавка уплотнительной поверхности с поперечным колебанием электрода

Крановые колеса. Для наплавки применяют проволоку Нп-30ХГСА и флюсы АН-348А или АН-20. Наиболее целесообразен способ с перемещением дуги после каждого полного оборота изделия на величину перекрытия валиков. Наплавка производится с предварительным подогревом до 250—300° С, на режиме: $I_д$ = = 400 ÷ 500 *а*, $U_д$ = 28 ÷ 30 *в*, $v_н$ (окружная) = 30 ÷ 40 *м/ч*.

Стойкость наплавленных крановых колес в 1,5—2 раза выше, чем литых из стали 50Г2.

Тормозные шкивы мостовых кранов. Наплавка применяется как при изготовлении новых шкивов, так и при восстановлении изношенных; чаще всего применяют проволоку ПП-3Х2В8 и флюс АН-20. Толщина наплавленного слоя 5—6 *мм*, твердость *НВ* 400—450. При большом износе нижние слои наплавляют сварочной проволокой Св-08 под флюсом АН-348А, а верхние два — порошковой проволокой. Шкивы диаметром до 500 *мм* наплавляют без подогрева, а большего диаметра — с подогревом до 200—250° С. Долговечность шкивов повышается в результате наплавки в 4—5 раз.

На некоторых заводах шкивы наплавляют проволокой Нп-30ХГСА под флюсом АН-348А. Долговечность в этом случае ниже, но используется более дешевая проволока и облегчается механическая обработка.

Керны клещевых кранов. Заготовку керна изготовляют из стали 45, а ее рабочую часть наплавляют электрошлаковым способом (см. рис. 7). Применяют прутки из стали 3Х2В8 диаметром 20 *мм*. В качестве флюса используют флюоритовый концентрат. Режим наплавки: $I_{св}$ = 1000 ÷ 1100 *а*, $U_{св}$ = 18 ÷ 22 *в*. Время наплавки одной детали 1,5 *мин*. После наплавки заготовки керна нагревают до 1200° С и для придания необходимой формы обжимают в штампе под молотом. Внедрение электрошлаковой наплавки позволяет сократить расход керна примерно в 6 раз.

Венцы червячных шестерен. Для наплавки венцов червячных колес применяют проволоку марки Бр.АЖМц 10-3-1,5 диаметром 6 *мм* и флюс АН-60. Режим наплавки колеса диаметром 600 *мм*: $I_д$ = 650 ÷ 700 *а*, $U_д$ = 32 ÷ 34 *в*,

$v_д$ = 25 *м/ч*. Применение наплавки позволяет сократить расход бронзы в 3—5 раз по сравнению с отливкой.

Ролики листоправильных машин. Рабочие ролики наплавляют проволокой Нп-3Х2В8 под флюсом АН-20. Режим наплавки: $I_д$ — 300 ÷ 320 *а*, $U_д$ = 30 ÷ 32 *в*, $v_н$ (окружная) = 25 *м/ч*. Твердость наплавленного слоя *НВ* 450—500. Опорные ролики наплавляют проволокой Нп-30ХГСА под флюсом АН-348А.

Ролики рольгангов. Наплавлять необходимо шейки и бочки роликов. Ролики из сталей 35, 40, 50 наплавляют без предварительного подогрева, а из сталей 45ХН, 40Х, 50Х — с подогревом до 300° С. Применяют проволоку Св-08 или Нп-30ХГСА и флюс АН-348А.

Количество слоев наплавленного металла определяется величиной износа роликов. Режимы наплавки: $I_д$ = 300 ÷ 400 *а*, $U_д$ = 28 ÷ 32 *в*, $v_н$ (окружная) = 25 ÷ 30 *м/ч*.

Наплавка штампов

Штампы наплавляют преимущественно штучными электродами. В табл. 29 (стр. 264) показаны рациональные области наплавки штампов электродами ЗИ-6ОМ и ОЗИ-1 и режимы термической обработки. Наплавку рекомендуется производить непрерывно. Для предупреждения трещин необходимо строго соблюдать установленную температуру предварительного подогрева и не допускать снижения ее в процессе наплавки. При возможности обработки абразивом после наплавки производится только отпуск штампов, если нужна обработка режущим инструментом — проводят отжиг, закалку и отпуск.

Молотовые и высадочные штампы. Термическая обработка после наплавки нежелательна. Твердость наплавленного слоя в зависимости от размеров штампа требуется *HRC* 52.

Применяются следующие способы наплавки. Атомноводородная наплавка. Присадочные прутки из стали, одноименной с наплавленным металлом. Предварительный подогрев 400—450° С. Твердость наплавленного слоя *HRC* 25—30; стойкость восстановленных штампов примерно 75—80% от стойкости новых. Этот способ восстановления штампов сравнительно трудоемкий и дорогой.

Наплавка штучными электродами. Используют электроды марок ОЗИ-400, УОНИ-13/95, ЦШ-2, Т-546А или ОЗШ-1. Наиболее перспективны электроды ОЗШ-1. При возможности обработки абразивом может быть рекомендована также наплавка электродами ЗИ-6ОМ и ОЗИ-1 в один или два слоя. Необходим предварительный подогрев до 400—500° С и отпуск после наплавки для снятия напряжений. Допускается толщина наплавленного слоя не более 10 *мм*. Производительность примерно вдвое больше по сравнению с атомноводородной наплавкой.

Электрошлаковая наплавка. В качестве электродов используют кованые или прокатанные прутки из стали марки 3Х2В8 или 5ХНТ или из сплава Т-546А; флюс АН-Ф1, а для наведения ванны — АН-25. Необходим предварительный подогрев до 450—600° С. Прошивные пуансоны можно восстанавливать без подогрева.

Восстановленные штампы отжигают, подвергают механической обработке, а затем закалке и отпуску.

Наплавка лопастей гидротурбин

Лопасти обычно отливают из низколегированных сталей, и на рабочей поверхности создают слой, обладающий хорошим сопротивлением кавитации. Хорошие результаты достигнуты при наплавке на лопасти слоя нержавеющей стали. Наплавку производят лентой из стали 1Х18Н9Т под флюсом АН-26. Для предупреждения трещин к флюсу добавляют 2,5—3% по весу лигатуры, содержащей 80—85% алюминия и 15—20% железа. Режим наплавки для ленты шириной

70 *мм* и толщиной 0,6—0,8 *мм* следующий: $I_д$ = 700 ÷ 750 *а*, $U_д$ = 30 ÷ 34 *в*, $v_н$ — 9,6 *м/ч*.

При развитой кавитации на стойкость металла оказывают преимущественное влияние не коррозионные, а механические факторы (микроудары). В этих условиях хорошо противостоят износу стали, способные в процессе деформации упрочняться в результате распада аустенита с образованием мартенсита, как, например, хромомарганцевая аустенитная сталь 30Х10Г10. Для наплавки этой стали разработаны электроды УНИ-30Х10Г10, порошковая проволока и литая лента. Механизированная наплавка лопастей поворотно-лопастных и радиально-осевых турбин наиболее эффективна.

Лопасти радиально-осевых турбин наплавляют до сварки колеса. Отливают из стали 20ГСЛ. Наплавляют примерно 60% общей поверхности лопасти с тыльной стороны, подверженной кавитационному разрушению. Наплавляемый участок должен находиться в горизонтальном положении. Электродом служит литая лента из стали 30Х10Г10 толщиной 0,7—1 *мм* и шириной 70 *мм*, флюс марки 48-ОФ-10. Режим наплавки: $I_д$ = 850 ÷ 900 *а*, $U_д$ = 28 ÷ 32 *в*; $v_н$ = = 6,5 ÷ 7 *м/ч*. Лопасть в процессе наплавки охлаждается воздухом. Небольшие участки, недоступные автомату, наплавляют вручную электродами УНИ-30Х10Г10.

Разработана технология полуавтоматической наплавки лопастей гидротурбин порошковой электродной проволокой ПП-30Х10Г10 в среде углекислого газа.

Наплавка судовых валов

Валы диаметром 60—40 *мм* наплавляют под флюсом малоуглеродистой электродной проволокой (если требуется только восстановить размеры) или (при необходимости защиты вала от коррозии) проволокой марки Св-08Х20Н10Г6 или Св-08Х20Н9Г7Т в сочетании с флюсом АН-26. Эти материалы используют при наплавке первого слоя, чтобы исключить образование трещин. Последующие слои наплавляют той же проволокой или проволокой марки Св-1Х18Н9Т.

При наплавке валов диаметром 200 *мм* и более для предупреждения трещин необходим предварительный подогрев до 200—300° С. Участок вала длиной 400—500 *мм*, где начинается наплавка, подогревают с помощью индуктора током промышленной частоты. В дальнейшем температура поддерживается за счет нагрева дугой.

После окончательной механической обработки следует обкатка роликом при помощи приспособления, укрепляемого на суппорте токарного станка. Обкатка необходима для повышения усталостной прочности вала.

Армирование и наплавка бурового инструмента

Шарошки буровых долот. Зубья должны обладать хорошей сопротивляемостью износу и самозатачиваться при работе. Это достигается армированием поверхности зубьев зернами литых карбидов вольфрама и цементацией.

Порошок релита (эвтектического сплава карбидов WC и W_2C) с размером зерен 0,3—0,5 *мм* смешивают с 9% буры и наносят на поверхность зуба. Для точной дозировки применяют прессованные брикеты, соответствующие форме оснащаемой грани зуба.

Армируемую грань зуба шарошки подводят к индуктору. Металл расплавляется только на требуемую глубину. Вследствие большого удельного веса частицы твердого сплава погружаются в расплавленный металл и после его кристаллизации фиксируются. Расплавления карбидов при этом не происходит, но зерна несколько растворяются в жидкой стали, что способствует упрочнению матрицы.

Известен также способ армирования шарошек твердыми сплавами с помощью ацетилено-кислородного пламени вручную. Сперва наплавляют все торцовые поверхности зубьев наружного венца, а затем грани зубьев остальных венцов

Присадочным материалом служат трубки из мягкой стали, заполненные зернами релита (так называемый «грубчатый зернистый сплав» или ГЗС).

Буровые шарошки для установок Шепотьева-Иванова. Восстановление осуществляется с помощью электрошлаковой наплавки. Применяется комбинация трубчатого и конического электрода, рассчитанная так, что при плавлении трубчатой части восстанавливается радиальный участок изношенной шарошки, а при плавлении конической — торцовая поверхность (см. рис. 8). Для трубчатой части электрода используют бурильные трубы марки Д(0,45% C; 0,63% Mn; 0,25% Si), а для конической — листовую сталь марки 65Г; флюс АН-8. Режим наплавки цилиндрического участка: $I_{св} = 2200$ *а* $U_{св} = 41 \div 46$ *в*, глубина шлаковой ванны 40—50 *мм*, $v_{под} = 3 \div 3{,}5$ *м/ч*. Режим наплавки торца шарошки: $I_{св} = 2200 \div 4000$ *а*, $U_{св} = 38 \div 41$ *в*, глубина шлаковой ванны 30—35 *мм*, $v_{под} = 3 \div 8$ *м/ч*. После наплавки следует термообработка: изотермический отжиг 750—780° С, 2 *ч*, затем — 650° С, 3 *ч*, охлаждение с печью. Далее производится механическая обработка, а затем закалка с 770—800° С в масло с последующим отпуском при 200° С.

Твердость наплавленного слоя после термической обработки *HRC* 50—55.

Наплавка деталей двигателей внутреннего сгорания

Выпускные клапаны. Для массового производства выпускных клапанов автомобильных двигателей используют плазменную наплавку. Присадочным материалом служат металлокерамические кольца, спрессованные из смеси порошков никеля, хрома, графита и других материалов и затем спеченные в вакууме. Металлокерамическое кольцо укладывают в соответствующую выточку тарелки клапана. Кольцо расплавляют плазменной горелкой в среде аргона (см. рис. 11). В результате на рабочей фаске клапана получается слой жаростойкого сплава. Для клапанов легковых автомобилей используют сплав типа Х28Н45С2, содержащий 0,8—1,0% C; 2,0—2,4% Si; 26—30% Cr; 21—34% Fe; основа Ni. Для клапанов автомобиля ЗИЛ-130 применяют сплав Х25Н40В6, содержащий 1,4—1,6% C; 24—27% Cr; 5,5—7,0% W; 22—28% Fe; около 1% Mn и 0,6% Si [21]. При наплавке клапанов последнего типа диаметром 42 *мм* применяют следующий режим: $I_{св} = 200$ *а*, $U_{д} = 22$ *в*; расход аргона в рабочем сопле 1—1,5 *л/мин*, в защитном — 4—6 *л/мин*; $v_{н} = 23$ *м/ч*.

Наплавка увеличивает долговечность клапана в 2—4 раза.

Толкатели клапанов. Для массового производства толкателей клапанов используется индукционная наплавка токами высокой частоты [27]. В заготовке толкателя предварительно делают соответствующих размеров выточку и нагревают до 1150—1200° С. Порцию чугуна расплавляют в огнеупорном тигле и заливают в выточку. Для предохранения металла от окисления в нее предварительно помещают 0,2—0,5 *г* буры. Для хорошей износостойкости необходимо получить слой отбеленного чугуна, это достигается охлаждением заготовки водяным душем до 700—750° С, дальнейшее охлаждение происходит на воздухе.

Для толкателей нижнеклапанных двигателей применяют чугун, содержащий 3,1—3,4% C; 2,2—2,4% Si; 0,4—0,7% Mn; 1,6—1,9% Cr; 0,4—0,7% Ni. Твердость наплавленного слоя не ниже *HRC* 52.

При наплавке толкателей верхнеклапанных двигателей твердость слоя должна быть не меньшее *HRC* 60. В этом случае в чугун дополнительно вводят 0,5% Mo.

СВАРКА И ПАЙКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Режущий инструмент имеет рабочую (режущую) и присоединительную части. Рабочую часть изготовляют из инструментального материала (целиком или только режущие элементы), присоединительную — из конструкционной стали. Основные виды инструментальных материалов для режущих инструментов — быстрорежущие стали и металлокерамические твердые сплавы.

30. Способы сварки и пайки, применяемые при изготовлении инструментов

Способ сварки	Краткая характеристика	Изготовляемый инструмент	Экономия быстрорежущей стали, достигаемая при изготовлении инструмента в % по весу
	Сварка оплавлением		
Стыковая, контактная оплавлением	Производится с предварительным подогревом замыканиями и размыканиями свариваемых торцов заготовок при включенном сварочном трансформаторе стыковой машины до оплавления торцов и прогрева концов заготовок вглубь от них. После подогрева дается кратковременное оплавление и осадка	Концевой (сверла, зенкеры, развертки, метчики, фрезы), резцы малых сечений и зуборезный инструмент (долбяки концевые, гребенки и резцы зуборезные)	50–60
Стыковая трением	Производится с предварительным подогревом торцов и прогревом концов заготовки, за счет теплоты, выделяющейся в стыке при быстром вращении одной заготовки относительно другой, взаимно прижатых осевым давлением; после подогрева дается быстрая осадка	Концевой цилиндрической формы	50–60. Повышенная экономия быстрорежущей стали за счет в 2 раза меньшего припуска на сварку по сравнению со стыковой сваркой оплавлением
Прессовая по методу А. М. Игнатьева	Пакет из двух или нескольких слоев стали нагревается проходящим по нему током большой силы до температуры сварки и затем сдавливается (давление перпендикулярно направлению тока). Сварка проводится на специальном приспособлении к стыковым машинам	Призматической формы, например, тангенциальные призматические резцы	2 до 80
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 насыпается сварочный порошок с температурой плавления в интервале температуры нагрева под закалку быстрорежущей стали. Производится на точечных машинах	Резцы, оснащенные пластинками из быстрорежущей стали	—
	Сварка плавлением		
Электродуговая наплавка металлическим электродом со специальным покрытием	Наплавка режущих кромок инструмента быстрорежущей сталью или сплавом. Электроды применяются со стержнем из быстрорежущей стали	Многолезвийный, например, фрезы концевые и цилиндрические, отрезные резцы	2 до 85

Электродуговая приварка ножей из быстрорежущей стали к корпусу инструмента	Приварка к корпусу инструмента пластин или ножей из быстрорежущей стали. Используются электроды из аустенитной хромоникелевой стали	Многолезвийный	До 70
	Пайка		
Печная, в очковых пламенных печах	Прикрепление пластинок из твердого сплава или быстрорежущей стали к корпусу инструмента с использованием припоя или сварочного порошка	Резцы различных типов	—
Печная, 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, например, фрезы, вставные ножи к сборному инструменту, резцы малых размеров	—
Контактная с косвенным нагревом пластинок из твердого сплава	Прикрепление пластинок из твердого сплава к корпусу инструмента с использованием джоулева тепла, выделяющегося при прохождении тока через часть инструмента, оснащенную твердым сплавом. Для пайки применяются стыковые машины малой мощности	Резцы и вставные ножи к сборному многолезвийному инструменту	—
Индукционная	Прикрепление пластинок из твердого сплава к корпусу инструмента с индукционным нагревом от лампового или машинного генератора токов высокой частоты	Широкой номенклатуры, оснащенный твердым сплавом	—
Ванная, погружением в расплавленный припой	Прикрепление пластинок из твердого сплава к корпусу инструмента погружением последнего в расплавленный припой	С пластинками из твердого сплава, вставленными в закрытые пазы корпуса (зенкеры, развертки, сверла)	—
Ванная, погружением в расплавленную соль как нагревательную среду	Прикрепление пластинок из твердого сплава или из быстрорежущей стали к корпусу инструмента. Одновременно с пайкой происходит закалка быстрорежущей стали	С пластинками из твердого сплава или из быстрорежущей стали, вставленными в закрытые пазы корпуса инструмента	—
Газовая, в пламени ацетилено-кислородной горелки	Нагрев корпуса инструмента и пластинок из твердого сплава пламенем газовой горелки	Резцы малых размеров и многолезвийный инструмент	—

Способы получения неразъемного соединения рабочей части инструмента с присоединительной или режущих элементов рабочей части инструмента с его корпусом указаны в табл. 30.

Стыковая контактная сварка оплавлением с предварительным подогревом торцов заготовок в губках машины наиболее распространена в инструментальном производстве.

Для сварки используют универсальные ручные стыковые машины модели МСР-60, МСР-75, МСР-100 и оснащенную автоматическим приводом машину модели МСМУ-150. Заготовки под сварку из быстрорежущей стали и конструкционной стали должны иметь свариваемые торцы, одинаковые по форме и равной площади. Различают заготовки простые цилиндрической формы и стержневые и ступенчатые, если диаметры рабочей и присоединительной части не одинаковы. В этом случае на заготовке большего диаметра протачивают шейку. Диаметр заготовки рабочей части выбирают по табл. 31. Технологический припуск на

31. Припуск на диаметр при стыковой контактной сварке

Диаметр готового изделия в мм	Величина припуска при длине изделия в мм до:										
	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
Рабочая часть заготовки											
6—10.5	1.40	1.45	1.60	1.70	1.90	2.15	2.40	2.70	3.00	3.30	3.50
10.6—14	1.40	1.45	1.60	1.75	1.90	2.15	2.40	2.70	3.00	3.30	3.50
14.25—23	1.60	1.65	1.80	1.95	2.10	2.35	2.60	2.90	3.20	3.50	3.70
23—31.5	1.60	1.65	1.80	1.95	2.10	2.35	2.60	2.90	3.20	3.50	3.70
31.75—50.5	2.00	2.05	2.20	2.35	2.50	2.75	3.00	3.30	3.60	3.90	4.10
51—70	2.20	2.25	2.40	2.55	2.70	2.95	3.20	3.50	3.80	4.10	4.30
72—80	2.60	2.65	2.80	2.95	3.10	3.35	3.60	3.90	4.30	4.50	4.70
Присоединительная часть заготовки											
6—14	1.5	1.65	1.80	1.90	2.10	2.35	2.60	2.90	3.20	3.5	3.7
14.25—23	1.85	1.90	2.05	2.15	2.35	2.60	2.85	3.15	3.45	3.75	3.95
23—50.5	2.00	2.05	2.20	2.30	2.50	2.75	3.00	3.30	3.60	3.90	4.10
51—60	2.45	2.50	2.65	2.75	2.95	3.20	3.45	3.75	4.05	4.35	4.55
61—80	2.7	2.75	2.90	3.00	3.20	3.45	3.70	4.00	4.30	4.60	4.80

номинальный диаметр определяется припусками на снятие обезуглероженного слоя, на овальность заготовки, на шлифовку и кривизну сварной заготовки. Последний зависит от длины заготовки, поэтому значения технологических припусков на диаметр даны в зависимости от длины заготовки.

Аналогично определяют диаметр заготовки присоединительной части (табл. 32). Чтобы смещение осей свариваемых заготовок не вызвало необходимости

32. Допуски на заготовки и сборку свариваемого инструмента (для стыковой контактной сварки)

Диаметр готового изделия в мм	Смещение осей заготовки в мм	Допуск на длину в мм	Допуск на неровности торцов в мм для стали	
			быстрорежущей	конструкционной
6—14	0.40	±0.5	0.6	0.5
14.25—31.5	0.42			
31.75—36	0.50			
36.5—50.5	0.50		0.7	0.6
51—60	0.57		0.8	0.7
61—75	0.65		0.9	0.8
78—80	0.70		0.9	0.8

увеличивать технологический припуск, оно должно быть в пределах, указанных в табл. 32. Контактные поверхности заготовок должны быть очищены от загрязнений. Рекомендуется очистка заготовок в галтовочных барабанах. Режимы стыковой контактной сварки заготовок инструмента приведены в табл. 33.

В последние годы значительно возросло число марок быстрорежущих сталей. Стали отличаются по химическому составу и физико-механическим свойствам; поэтому режимы их сварки также различны (табл. 34). Качество сварных заготовок характеризуется временным сопротивлением при испытании на растяжение (табл. 35). Прочность соединения определяется в первую очередь прочностью конструкционной стали присоединительной части.

Свариваемость стыковой контактной сваркой быстрорежущих сталей со сталью 45 определяется по эмпирической формуле

$$C = B_0 B_1 B_2 B_3 \sigma^{n}_{ист}.$$

Формула связывает норму прочности соединения ($\sigma^{n}_{ист}$), вероятность получения соединения заданной нормы прочности (коэффициент B_0) с коэффициентами, определяющими рациональность технологии сварки. Коэффициенты B_1, B_2 и B_3 учитывают соответственно производительность процесса, величину припуска, расход электрической энергии:

$$B_1 = \left(\frac{0{,}02d^2}{t_{общ}}\right)^{0,15};$$

$$B_2 = \left[\frac{0{,}6\,(0{,}1d + 4{,}1)}{\delta_{общ}\eta}\right]^{0,15};$$

$$B_3 = \left(\frac{445}{w}\right)^{0,15},$$

где d — диаметр сварной заготовки в *мм*;

$t_{общ}$ — продолжительность процесса сварки в *сек*;

η — коэффициент, определяющий припуск на сварку быстрорежущей стали;

$\delta_{общ}$ — общий припуск на сварку в *мм*;

w — удельный расход электроэнергии на сварку в *дж/мм*^{2}.

Норма прочности определяется по истинной $\sigma_{ист}$ или временной $\sigma_в$ прочности на растяжение сварного соединения с учетом масштабного фактора.

Для сварных заготовок диаметром до 18 *мм*

$$\sigma^{n}_{ист} = \sigma_{ист} = \sigma_в\,(1 + 1{,}07\psi).$$

Для сварных заготовок диаметром свыше 18 *мм* относительное сужение ψ мало и с достаточной точностью

$$\sigma_{ист} = \sigma_в = 50 + \frac{55}{\sqrt{F_0}},$$

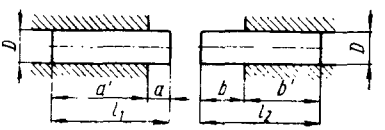
где F_0 — площадь свариваемого сечения в *мм*^{2}.

Для заготовки диаметром 20 *мм* $\sigma_{ист} = 68$ *кГ/мм*^{2}.

Численные значения коэффициентов B_1, B_2. B_3 близки к единице, и факторами, определяющими свариваемость, будут норма прочности соединения (табл. 36) и вероятность получения заданной нормы прочности, определенная статистической обработкой данных большого количества испытаний сварных образцов на растяжение. Значения коэффициента B_0 и коэффициентов, необходимых для определения B_2, B_3, даны в табл. 36.

33. Технологическая карта стыковой контактной сварки заготовок инстру

Быстрорежущая сталь Конструкционная сталь



Диаметр заготовок в мм			Длина заготовки в мм			Припуск в мм на сварку для стали			Вылет концов из зажимов в мм	
	Допуск для стали		до сварки [1]		после сварки					
D	быстрорежущей	конструкционной	l_1	l_2		быстрорежущей	конструкционной	Допуск	a	b
8–12	±0,5	+0,3 −0,5	32	40	66,5	3,5	2,0		10	15
13–15	±0,6	+0,3 −0,5	32	40	65,5 ±1,0	4,0	2,5	−0,5	10	15
16–25	±0,7	+0,4 −0,5	40	52	85,5	4,0	2,5		16	24
26–34	±0,9	+0,4 −0,7	47	60	100	4,5	2,5		19	28
35–39	±1,2	+0,4 −0,7	55	70	118 ±1,5	4,5	2,5		24	36
40–50	±1,3	+0,4 −1,0	60	78	130 −1,0	5,0	3,0	−1,0	28	42
51–55	±1,6	+0,4 −1,0	70	88	148,5	6,0	3,5		32	48
56–60	±1,6	+0,5 −1,0	72	95	157	6,5	3,5		34	51
61–65	±1,6	+0,5 −1,1	75	100	164	7,0	4,0		34	51
66–75	±1,8	+0,5 −1,1	77	100	171 ±2,5 −1,0	7,5	4,5	−2,0	36	54
76–80	±2,0	+0,5 −1,3	80	110	178	7,5	4,5		38	57
81–85	±2,0	+0,5 −1,3	82	115	185	7,5	4,5		40	60

[1] Допуск ±0,5.

Примечание. Скорость оплавления 1,5—1,8 *мм/сек*, осадки 10—16 *мм/сек*.

мента из быстрорежущей стали Р9, Р18 с конструкционной (45, 40Х)

Технические требования

1. Если длина рабочей части 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 ровной и перпендикулярной к продольной оси заготовки. Максимальное отклонение от перпендикулярности в зависимости от диаметра заготовок указано в табл. 32.
3. При сварке заготовок круглого сечения различных диаметров на заготовке большего диаметра должна быть сделана шейка диаметром, равным диаметру меньшей заготовки.

Минимальная длина зажима в мм		Напряжение на губках машины Б	Плотность тока в a а/мм²		Мощность в ква	Усилие		Время сварки в сек	
a'	b'		Подогрев	Оплавление		осадки в $\Delta l'$, кг/мм²	зажатия в $\Delta l'$	$t_{св}$	$t_{всп}$
22	25	3,8—4,0	40—30	12,5—10	10	3,5—4,0	175—200	5	24
22	25	3,8—4,0	40—30	12,5—8,0	15		340—390	7	24
24	28	4,0—4,5	30—20	10—7,5	30		550—630	12	24
28	32	4,5—5,0	20—15	7,5—4,5	50		1220—1400	19	21
31	34	5,0—5,5	20—15	7,5—4,5	65		1570—1830	24	21
32	36	5,5—6,0	15—10	4,5—3,0	80	3,0—3,5	2400—2780	31	21
38	40	6,5—7,0	10—8	3,0—2,6	90		3200—4700	37	23
38	44	6,5—7,0	10—8	3,0—2,6	100		3300—3960	48	24
41	49	7,0—7,5	8—6,5	2,6—2,4	110		4500—5470	64	28
41	52	7,0—7,5	8—6,5	2,6—2,4	130	2,5—3,0	4800—5750	72	38
42	53	7,5—8,0	6,5—6	2,4—2,3	140		6000—7000	72	58
42	55	7,5—8,0	6,5—6	2,4—2,3	150		6600—7300	96	74

34. Режимы стыковой контактной сварки быстрорежущих сталей со сталью 45

Диаметр заготовки в мм	Припуск в мм									Усилие осадки в кГ			Потребляемая мощность в ква		
	на подогрев			на оплавление			общий								
	гр. I	гр. II	гр. III	гр. I	гр. II	гр. III	гр. I	гр. II	гр. III	гр. I	гр. II	гр. III	гр. I	гр. II	гр. III
8–10	1,0	-	1,6	2,4	2,2	1,6	5,4	4,4	5,8	250	380	320	7	9	6
10,1–12,5	1,4	–	1,7	2,3	2,4	1,7	5,7	4,6	6,0	380	570	475	10	12	9
12,6–16	1,2	-	1,8	2,4	2,5	1,8	6,0	4,8	6,4	600	900	750	15	17	13
16,5–20	1,3	1,2	1,9	35	2,7	1,9	6,4	6,0	6,8	980	1 470	1 180	25	30	22
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	30
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	2 550	50	60	45
33–40	1,7	1,5	2,4	3,3	3,5	2,4	8,2	7,8	8,6	3 560	5 350	4 450	60	70	53
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	87
52–63	2,3	2,0	3,0	4,0	4,3	3,0	10,4	10,0	10,8	7 850	14 700	9 800	120	150	105
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	115

Примечания: 1. В группу I входят стали Р9, Р12, Р18, Р9К5; в гр. II – Р6М3, Р6М5, Р9М3К5, Р9М4, Р9М4К8; в гр. III – Р9Ф5, Р9К10, Р10К5Ф5, Р14Ф4, Р18Ф2.

2. Длительность замыканий торцов при подогреве 0,08–0,2 *сек*. Длительность пауз 0,12–0,3 *сек*; с увеличением диаметра заготовок длительность замыканий и пауз увеличивается.

3. Скорость оплавления: для сталей I гр. – 2,2–0,8 *мм/сек*; II гр. – 2,5–1,0 *мм/сек*; III гр. – 2,0–0,8 *мм/сек*, с увеличением диаметра заготовок скорость оплавления уменьшается.

4. Скорость осадки 15–10 *мм/сек*. Припуск на осадку равен разности между общим припуском и припуском на подогрев и оплавление. Начало осадки происходит при включенном сварочном токе. Ток выключается, когда осадка произведена на 0,5–1,0 *мм*.

5. Припуск на быстрорежущую сталь равен $\eta\sigma_{общ}$, для сталей I гр. $\eta = 0,7$; II гр. $\eta = 0,6$; III гр. $\eta = 0,72 \div 0,83$.

35. Прочность основного металла и сварного соединения в отожженном состоянии (стыковая контактная сварка)

Марка свариваемых сталей		Предел прочности кГ/мм²			Марка свариваемых сталей		Предел прочности в кГ/мм²		
быстрорежущей	конструкционной	быстрорежущей стали	конструкционной стали	сварного соединения	быстрорежущей	конструкционной	быстрорежущей стали	конструкционной стали	сварного соединения
Р18	35	80–90	56–60	58	Р6М3	45	72–80	57–68	65
	45		57–58	65		У8		65–75	72
	40Х		58–69	66		У10		58–68	66
	У8		65–78	72		У12		60–70	61,5
	У10		58–68	65					
	У12		60–70	62					
Р12	45	80–85	57–68	69	Р9Ф5	45	74–78	57–68	64
					Р14Ф4		79–99		63
					Р18Ф2		80–90		62
					Р9К5		75–80		63,5
Р9	45	70–90	57–68	64	Р9К10		83–89		61
	40Х		58–69	64	Р10К5Ф5		85–93		61
					Р6М3К5		75–80		65
					Р9М4		75–80		64
					Р9М4К5		77–83		63,5

36. Значение расчетных коэффициентов

Группа стали	Марка стали	B	B_0	η_1	σ	C_p
I	Р12	1.0	0.75	0.71	465	1.0
	Р9		0.65	0.7	590	0.86
	Р18		0.64	0.67	560	0.85
	Р9К5		0.60	0.7	565	0.78
II	Р6М3	0.9	0.71	0.68	445	0.975
	Р6М3К5		0.69	0.57	470	0.955
	Р9М4		0.65	0.58	545	0.875
	Р9М4К8		0.61	0.59	540	0.815
III	Р14Ф4	1.1	0.59	0.73	550	0.73
	Р18Ф2		0.46	0.72	575	0.59
	Р9Ф5		0.45	0.74	595	0.55
	Р10К5Ф5		0.38	0.83	600	0.475
	Р9К10		0.38	0.81	500	0.48

Продолжительность процесса сварки определяется временем t_n, требуемым на подогрев, поскольку длительность оплавления и осадки малы:

$$t_n = \frac{(60 + 2d)(t_p + t_3)\,dB}{J_1}.$$

Значения B даны в табл. 36.

В табл. 36 приведена также сравнительная характеристика свариваемости C_p (свариваемость стали Р12 со сталью 45 принята за единицу).

37. Режимы сварки трением заготовок инструмента с рабочей частью из стали Р18 и присоединительной частью из стали 45 (40Х)

Диаметр заготовок в мм	Вылет из зажимов		Вылет из оправки стали 45 в мм	Давление в кГ/мм²		Усилие на штоке в кГ		Время в сек					Припуск на сварку в мм для стали		Машина
	Сталь Р18	Сталь 45		подогрев	осадка	подогрев	осадка	подогрева	осадки	сварки	вспомогательное	общее	Р18	45	
12	9	35	2	13	19	1470	2 150	12	2	14	8	22	2	2,5	МФ-327, МСТ-23 (n=1500 об/мин)
15	10			9,5	15,5	1960	2 740	12		14		22	2	3,5	
18	12			7	12	1780	3 670	20		16		24	1,5	3,0	
21	15			5,5	7,5	1580	2 250	20		22		30	1,5	3,0	
24	40	35	1,5	7,5	14,0	3400	6 334	25	1,5	26,5	10	36,5	1,5	3,5	МФ-341, МСТ-35 (n=1000 об/мин)
26				8,0	15,0	4250	7 965	25		26,5	10,5	37	1,5	2,5	
28				8,0	14,0	4930	8 624	25		26,5	10,5	37	1,5	2,5	
30				8,0	14,0	5650	9 900	30		31,5	10,5	42	1,0	2,0	
32				8,0	14,0	6440	11 256	30		31,5	10,5	42	3,0	2,0	
35	40	35	1,5	7,5	13,0	7200	12 500	30	1,5	31,5	12,5	44	1,0	30	МФ-341, МСТ-41 (n = 750 об/мин)
40						9430	16 910								

При сварке заготовок из быстрорежущих сталей необходимо для сталей III группы увеличивать общий припуск на сварку на 15—20%, в том числе на осадку на 10—12% и на подогрев на 5—8%, стали этой группы склонны к поджогам и требуют тщательной очистки перед сваркой и надежного зажатия заготовок. Сварку проводить с предварительным подогревом при уменьшенной силе сварочного тока.

Стали II группы склонны к перегреву, поэтому длительность сварки следует уменьшать, сокращая подогрев до двух — трех замыканий, или вести сварку непрерывным оплавлением (для диаметров до 18 *мм*).

38. Предел выносливости при испытании на знакопеременный изгиб [число циклов $(1 \div 1{,}5) \cdot 10^6$] отожженных сварных образцов в зависимости от способа и режимов сварки

Виды сварки	Диаметр сварных заготовок в *мм*	Диаметр образцов в *мм*	Предел выносливости в *кГ/мм²*
Стыковая контактная на оптимальном режиме (машина АСА-30)	23	7.52	28.0
Трением, режимы завода «Фрезер» (машина МФ-327)	18	9.48	19,5
Трением на режиме ВНИИ (машина МФ-327)	18	9.48	26.0
Трением на режиме ВНИИ (машина МСТА-31)	30	7.52	22—24

В последние годы в инструментальном производстве получила распространение стыковая сварка трением. Преимущества ее перед электростыковой сваркой следующие: меньший в 2 раза припуск на сварку быстрорежущей стали, меньшее потребление энергии, бо́льшая точность свариваемых заготовок, автоматическое выполнение процесса. Режимы сварки трением заготовок из быстрорежущей стали Р18 со сталью 45 даны в табл. 37.

Некоторые виды сварных инструментов, например концевые фрезы, в месте сварного шва испытывают циклическую нагрузку на изгиб. На предел выносливости отожженных сварных заготовок оказывают влияние способы и режимы сварки (табл. 38). Цельные образцы из стали Р18 имеют предел выносливости 39 *кГ/мм²*, а из стали 45—29 *кГ/мм²*.

39. Химический состав, температура плавления и механические корпуса

Марки припоя	Химический			
	Cu	Zn	Ni	Mn
АНМц 0,6-4-2	Остальное	—	3—4	1,5—2,5
МНМц 68-4-2	62—68	Остальное	4—5	1,5—2
Медь электролитическая	99,95	—	—	—
Латунь Л62	60,5—63,5	Остальное	—	—

Пайка — основной способ соединения пластин из твердого сплава с корпусом инструмента. В инструментальном производстве наиболее распространена пайка с индукционным нагревом. Она ведется в петлевых индукторах, позволяющих легко регулировать скорость, последовательность и равномерность нагрева.

В начале процесса пайки нагрев корпуса инструмента должен опережать нагрев пластинки твердого сплава. Пластинки из твердого сплава — перед пайкой подвергают очистке галтовкой, дробеструйной обработкой, шлифованием.

Флюсы, применяемые при пайке твердого сплава, содержат буру, борную кислоту или борный ангидрид и фтористые соединения. Хорошие эксплуатационные качества имеет флюс, содержащий 60% плавленой буры, 30% борной кислоты и 10% фтористого кальция. Для пайки пластин из твердого сплава — с высоким содержанием карбида титана применяют флюс Ф-100, содержащий до 50% фтористых соединений.

Характеристика припоев, применявшихся при пайке твердого сплава, дана в табл. 39; общая характеристика паяемости твердого сплава — в табл. 40.

Средствами снижения остаточных напряжений в спае и твердом сплаве, возникающих после пайки, служат:

1. Закалка корпуса инструмента после пайки. Закалка может быть частичной, без погружения пластинки твердого сплава в охлаждающую среду (резцы, вставные ножи к сборному 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 — масло или расплавленные соли (50% KNO_3 и 50% $NaNO_2$) с температурой 230—260° С.
2. Релаксационный отпуск после пайки при температуре 220—240° С с выдержкой 6—8 *ч*.
3. Применение компенсационных прокладок из пермаллоя.

Для уменьшения остаточных напряжений при конструировании твердосплавного паяного инструмента необходимо выполнить следующие требования:

1. Отношение толщины пластинки из твердого сплава и толщины стальной части корпуса инструмента под пластинкой должно быть равным $^1/_3$.
2. Соединение пластинки из твердого сплава с корпусом должно быть по основной плоскости пластинки и по заниженной вертикальной стенке. Закрытых и полузакрытых пазов в корпусе инструмента под пластинки избегать.
3. Корпус паяного инструмента должен быть из стали с повышенными механическими свойствами, например, 40Х, 40ХФА, 35ХГС, 9ХС, позволяющей давать ему закалку.

Свойства припоев, применяемых для пайки твердых сплавов инструмента

состав в % вес.					
Al	Si не более	Температура плавления в °С	$\sigma_в$ в кг/мм² при		Условия работы инструмента
			20° С	600° С	
0.4 0.6	0.2	1020 1050	21 - 22	11 - 12	Тяжелые
—	0.3	950 980	26 - 27	7 - 8	Обычные
—	0.05	1083	16—13	2—4	Относительно легкие
—	—	900 905	20—28	2—2.2	Легкие

40. Паяемость твердых сплавов (при использовании инструментальных 30% борной кислоты.

Группа твердого сплава	Марка твердого сплава	Склонность к трещинообразованию при охлаждении	Растекаемость припоя
I. Вольфрамокарбидная с содержанием кобальта свыше 4%	ВК15; ВК10; ВК8; ВК8В; ВК6; ВК6М; ВК6В	Трещиноустойчивые; пластинки толщиной до 7 мм, нагретые до 550° и выше, охлаждаются в воде при 20° С без трещинообразования	Хорошая
IIА. Вольфрамокарбидная с содержанием кобальта 2—4%	ВК2; ВК3; ВК3М; ВК4; ВК4В;	Средней трещиноустойчивости; пластинки, нагретые до 350—550° С, охлаждаются в воде при 20° С без трещинообразования; с уменьшенным содержанием кобальта трещиноустойчивость снижается	Хорошая
IIБ. Вольфрамотитанокарбидная и вольфрамотитанотанталокарбидная	Т15К6; Т14К8; Т5К10; Т5К12В; ТТ7К12; ТТ10К8Б		Пониженная
III. Титанокарбидная	Т30К4	Низкая	Ограниченная

ЛИТЕРАТУРА

1. Аснис А. Е. и др. Автоматическая сварка с добавкой железных окатышей. «Автоматическая сварка», 1967, № 2.
2. Аснис А. Е., Гутман Л. М. Восстановление звеньев гусеничных машин. «Наукова думка», Киев, 1964.
3. Аснис А. Е. и Гутман Л. М. Легирование наплавленного металла через флюс для борьбы с порами. «Автоматическая сварка», 1957, № 6.
4. Аснис А. Е. и др. Сварка и наплавка под флюсом при ремонте локомотивов. М., Трансжелдориздат, 1958.
5. Бакши О. А. и др. Износостойкая наплавка ленточным порошковым электродом. «Сварочное производство», 1960, № 3.
6. Белов Ю. М. Особенности плавления электродного металла и флюса при автоматической дуговой наплавке ленточным электродом». «Сварочное производство», 1964, № 1.
7. Ваганов И. М. Восстановление изношенных крестовин из высокомарганцовистой стали. «Сварочное производство», 1957, № 9.
8. Грохольский И. Ф. Восстановление деталей машин и механизмов сваркой и наплавкой, М. — Л., Машгиз, 1962.
9. Гладкий П. В., Фрумин И. И. Плазменная наплавка. «Автоматическая сварка», 1965, № 3.
10. Гоголицын А. А. и др. Автоматическая наплавка коленчатых валов под флюсом. Каз. НИИНАТ, Алма-Ата, 1963.
11. Данильченко Б. В., Фрумин И. И. Электроннаковая наплавка некоторых видов штампов. Сб. «Наплавка сменного инструмента и штампов для холодной и горячей штамповки». ГОСИНТИ, М., 1963.

приноев МНМц 68-4-2 и АНМц 0,6-4-2 и флюса, содержащего 30% буры, 10% фтористого кальция

Прочность связи на срез в $кг/мм^2$				Скорость нагрева при пайке в *градусах*	Условия охлаждения	Паяемость
МНМц 68-4-2		АНМц 0,6-4-2				
20° С	600° С	20° С	600° С			
22—24	8—10	20—22	11—12	80—100	Замедленное; допускается закалка корпуса инструмента	Хорошая
22—24	8—10	20—22	11—12	40—50	Рекомендуется закалка корпуса инструмента или замедленное охлаждение и отпуск	Удовлетворительная
18—20	7—8	19—20	9—10	40—50	Релаксационный отпуск 220—240° 4—6 ч	Удовлетворительная
—	—	—	—	30—40	Релаксационный отпуск 220—240° 6—8 ч	Ограниченная, сплав низкой трещиноустойчивости, плохо смачивается приноем; применять флюс Ф-100

12. Данилов В. М. и др. Практическое руководство по водородной наплавке баббита. М. — Киев, Машгиз, 1959.
13. Емельянов Н. Н. Автоматическая наплавка деталей железнодорожного подвижного состава многоэлектродным автоматом. Сб. «Автоматическая наплавка износоустойчивыми сплавами». Машгиз, 1965.
14. Иванов Г. П. Технология электроискрового упрочнения инструментов и деталей машин. М., Машгиз, 1961.
15. Каленский В. К. и др. Исследование и разработка способа автоматической наплавки выпускных клапанов автомобилей. «Автоматическая сварка», 1963, № 1 и 8.
16. Ксендзык Г. В. Кольцевая электрошлаковая наплавка цилиндрических деталей в вертикальном положении. «Автоматическая сварка», 1966, № 5.
17. Клименко Ю. В. Восстановление изношенных поверхностей при помощи контактной сварки. «Автоматическая сварка», 1966, № 9.
18. Кушнерев Д. М. и Лялюкова И. В. Керамический флюс АНК-18 для механизированной износостойкой наплавки. «Автоматическая сварка», 1967, № 4.
19. Клементов В. П., Коломийченко В. Е. Продление срока службы изделий путем многоэлектродной наплавки. «Сварочное производство», 1967, № 3.
20. Космачев П. Г. Сварка и наплавка в производстве режущего инструмента. М. — Л., Машгиз, 1955.
21. Каленский В. К. Выбор жаропрочного сплава для плазменной наплавки клапанов грузовых автомобилей. «Автоматическая сварка», 1967, № 12.
22. Лебедев Ю. М., Мельник С. С., Фукельман М. Л. Автоматическая наплавка нержавеющих сталей двумя проволоками. «Сварочное производство», 1964, № 2.

23. Лукашек Я., Лебль К. Способ автоматической наплавки высоколегированных сталей и сплавов под флюсом. «Автоматическая сварка», 1959, № 12.
24. Лазаренко Н. И. Изменение исходных свойств поверхности катода под действием искровых электрических импульсов, протекающих в газовой среде. Сб. «Электроискровая обработка металлов». Вып. 1. Изд. АН СССР, 1957.
25. Львов Н. Н. Износостойкость деталей строительных и дорожных машин. М., Машгиз, 1962.
26. Максимович Б. И. и др. Наплавка дизельных клапанов расплавленным присадочным сплавом с применением индукционного нагрева. «Электротермия». Сб. № 61, 1967.
27. Наганзон Е. И., Тельнов Г. М. Наплавка толкателей клапанов автомобильных двигателей токами высокой частоты. «Автоматическая сварка», 1961, № 9.
28. Наливкин В. А. Централизованное восстановление деталей автоматической наплавкой и сваркой. Саратов, Приволжское книжное издательство, 1965.
29. Окада Х. и др. Сварка под флюсом с использованием рубленой проволоки. Реферат. Журнал «Металлургия», раздел «Сварка», 1964, № 11.
30. Павличков Н. Н., Мошенский Ю. А. Микродуговая наплавка пучком вращающихся электродов. «Автоматическая сварка». 1964. № 11.
31. Походня И. К. Электрошлаковая наплавка изнашивающихся деталей. НТО. Машпром, Киев, 1957.
32. Походня И. К. Прогрессивные способы наплавки деталей износостойкими сплавами. ВИНИТИ. М., 1959.
33. Походня И. К. Метод исследования процесса плавления и переноса электродного металла при сварке. «Автоматическая сварка», 1964, № 2.
34. Походня И. К. и Костенко Б. А. Плавление электродного металла и взаимодействие его со шлаком при сварке под флюсом. «Автоматическая сварка», 1965, № 10.
35. Підгаєцький В. В. Флюси для автоматичного зварювання. Держтехвидав УРСР, Київ, 1963.
36. Петренко Ф. И. Способы восстановления шеек коленчатых валов автотракторных двигателей. «Восстановление изношенных деталей машин наплавкой» (материалы семинара). Киевский дом научно-технической пропаганды, Киев, 1968.
37. Рабинович А. Я. и др. Сварка и наплавка деталей верхнего строения пути. М., Трансжелдориздат, 1951.
38. Разиков М. И., Королев Н. В. Влияние режимов широкослойной наплавки на размеры наплавленного слоя. «Автоматическая сварка», 1966, № 12.
39. Розенман И. А., Власов М. М. Сварка при ремонте металлургического оборудования. Свердловск — М., Металлургиздат, 1951.
40. Тягачев В. Н. Индукционная наплавка деталей почвообрабатывающих машин. ГОСИНТИ. М., 1963; см. также сборник «Индукционная наплавка твердых сплавов», ОНТИ, Ростов-на-Дону, 1963.
41. Тяпр Х. А. Исследование наплавки трением. «Автоматическая сварка», 1960, № 4.
42. Торопов В. А. и др. Автоматическая износостойкая наплавка деталей дорожных машин. ЦИИ информации по строительно-дорожному и коммунальному машиностроению, М., 1966.
43. Фрумин И. И. и др. Низкокремнистые флюсы для автоматической сварки и наплавки. «Автоматическая сварка», 1956, № 1.
44. Фрумин И. И. Автоматическая электродуговая наплавка. Харьков, Металлургиздат, 1961.
45. Фрумин И. И., Юзвенко Ю. А., Лейначук Е. П. Технология механизированной наплавки. М., «Высшая школа», 1964.
46. Хренов К. К., Кушнерев Д. М. Керамические флюсы для автоматической сварки и наплавки. Киев, Гостехиздат УССР, 1961.
47. Черпаков Ф. А., Богданов Ф. А. Аргоно-дуговая сварка и ее применение. Л., Судпромгиз, 1958.
48. Шварцер А. Я. Электрошлаковая наплавка. Донецкое книжное издательство, Донецк, 1963.
49. Шварцер А. Я. и др. Изготовление зубьев ковшей экскаваторов. «Автоматическая сварка», 1968, № 1.
50. Шляпин В. Б. Вибродуговая наплавка под флюсом деталей подвижного состава. М., Трансжелдориздат, 1962.
51. Шехтер С. Я. Восстановление оборудования механизированной наплавкой. М., «Металлургия», 1965.
52. Электрошлаковая сварка. 2-е изд. Под ред. Б. Е. Патона. М. — Киев, Машгиз, 1959.
53. Электроды для дуговой сварки и наплавки, каталог. Киев, «Наукова думка», 1967.
54. Юзвенко Ю. А. Механизированная наплавка электродной лентой опорных катков трактора ДТ-54. «Автоматическая сварка», 1961, № 2.
55. Юзвенко Ю. А. Порошковая лента. «Автоматическая сварка», 1960, № 9.
56. Юзвенко Ю. А. Легирующие неплавленные флюсы для автоматической и полуавтоматической наплавки. «Автоматическая сварка», 1959, № 10.
57. Blascovic P. Vyuzitie technologie elektrotroskovego navaranie na navaranie valcov. «Huntik», No 10, 1965.
58. The Quantity Produktion of Motor Car Valves «Mashinery» March, 1957.
59. Zuchovski R. S. and Garrabrant E. New Developments in Plasma Arc Weld Surfacing «Welding Journal», No 1, 1964.
60. Selection of Hard Facing Alloys «Metals Handbook ASM» 8 th Edition, Vol. 1. Properties and Selection of Metals. American Society for Metals, 1961.

ГЛАВА X

СВАРКА ЧУГУНА

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СВАРИВАЕМОСТИ

Сварка чугуна применяется для устранения различных дефектов литья, обнаруживаемых в литейных и механических цехах при изготовлении деталей и повреждений, полученных в процессе эксплуатации, а также при изготовлении сварно-литых чугунных отливок и трубопроводов.

По своим физическим свойствам, химическому составу и структуре чугун следует отнести к группе ограниченно сваривающихся сплавов, что определяется его низкой пластичностью и склонностью к отбеливанию при быстром охлаждении.

Трещины в металле шва, зонах термического влияния и в основном металле в процессе сварки могут возникать от неравномерного нагрева и охлаждения детали, литейной усадки металла шва, жесткости свариваемого изделия. Возможность образования трещин затрудняет процесс сварки чугуна, особенно в холодном состоянии. Трещины могут возникать в начале сварки, когда местный нагрев вызывает напряжения сжатия, в процессе сварки, а также при остывании сварного соединения, когда возникают напряжения растяжения. Опасность возникновения трещин резко уменьшается, когда свариваемая деталь равномерно нагрета до 350—600° С.

Чугун является многокомпонентным сплавом. Взаимодействие главнейших составляющих — углерода и кремния — в процессе кристаллизации обуславливает структуру чугуна и его механические свойства.

Углерод в чугуне может находиться в двух модификациях: в связанном состоянии в виде карбидов Fe_3C и в виде свободного графита. Количество углерода в виде свободного графита определяется химическим составом чугуна, скоростью охлаждения сплава и количеством активных центров кристаллизации. Медленное охлаждение сплава создает условия выпадения углерода из раствора в виде графита, быстрое охлаждение подавляет кристаллизацию графита и задерживает распад карбидов железа. Образование карбидов связано с диффузионным перемещением атомов углерода в расплаве. Если существуют условия отвода атомов железа от фронта кристаллизации, то происходит образование кристаллов графита. На конечную структуру сплава влияют: скорость охлаждения, степень переохлаждения жидкой ванны и устойчивость состава жидкой фазы при данной скорости охлаждения. Условия кристаллизации чугуна можно менять путем изменения количества центров кристаллизации. Искусственно вводя в жидкую ванну зародыши кристаллизации, можно резко уменьшить количество растворенного углерода в жидкой фазе и увеличить скорость образования графита. В качестве графитизаторов в чугунных сплавах могут быть использованы: углерод, кремний, алюминий, медь, никель, титан, ванадий. Характер воздействия этих элементов на сплав и степень графитизации различны.

Углерод увеличивает число центров кристаллизации в жидкой ванне, повышает температуру эвтектического состояния и тем самым способствует выпадению графита из раствора. Кремний, растворяясь в феррите, уменьшает растворимость в нем углерода и тем самым способствует выпадению его из раствора

Классификация способов сварки серого чугуна

в виде кристаллов графита. Кремний является очень сильным графитизатором и всегда используется в процессе сварки чугуна. Возможна также реакция между цементитом и кремнием $Fe_3C + 2Si \rightarrow Fe_3Si_2 + C$. Соединение Fe_3Si_2 растворимо в феррите и не повышает твердости конечной структуры. Алюминий повышает температуру металла сварочной ванны, раскисляет расплавленный металл и способствует увеличению центров графитизации. Введение в сплав 2% Al создает весьма бурный процесс кипения ванны и образование рыхлого металла шва.

Медь и никель не образуют соединений с углеродом, но их присутствие в сплаве уменьшает растворимость углерода в железе и способствует графитизации графита. Титан и ванадий образуют межатомные связи с углеродом значительно более прочные, чем между углеродом и железом. При наличии этих элементов в ванне расплавленного металла в первую очередь образуются карбиды ванадия и титана, которые не растворяются в железе и не дают твердых включений. Таким образом можно получить сварное соединение чугуна, свободное от твердых цементитных включений. Возможны значительные перемещения углерода из околошовной зоны в металл шва и обратное явление — увеличение количества углерода в переходных зонах вследствие диффузии его из металла шва, что оказывает значительное влияние на конечную структуру сварного соединения и его обрабатываемость.

Классификация способов сварки серого чугуна дана выше.

ГОРЯЧАЯ СВАРКА СЕРОГО ЧУГУНА

Сварка производится с общим или местным предварительным подогревом деталей, температура которого определяется размерами детали и ее жесткостью, способом сварки, объемом наплавляемого металла, химическим составом и структурой чугуна. В большинстве случаев достаточен нагрев до 400—550° С. Для ряда сложных и жестких деталей температура нагрева повышается до 600—650° С. Применять более высокий нагрев не рекомендуется, так как при этом чугун начинает резко терять прочность, а перегрев детали создает тяжелые условия труда и быстро утомляет сварщика. Большое значение при этом методе сварки имеет равномерность нагрева детали, особенно при сочетании тонких и массивных стенок, а также скорость нагрева, которая не должна превышать 120—150° С в час.

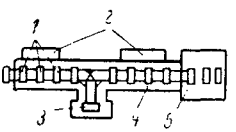
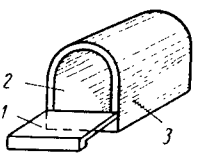
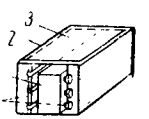
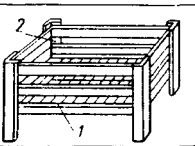
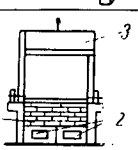
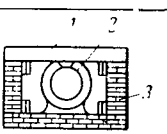
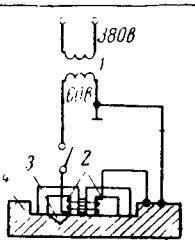
В зависимости от характера производства (устранение литейных дефектов, ремонтная сварка и т. д.) могут применяться различные способы нагрева (см. табл. 1).

Газовая сварка

Для горячей сварки чугуна в качестве горючего применяют любые промышленные газы, предназначенные для сварки и резки: ацетилен, пропан бутановые смеси, городской и природный газ. Наибольшую производительность обеспечивает ацетилено-кислородное пламя. При сварке используется пламя нормального состава $\beta = \frac{O_2}{C_2H_2} = 1{,}0 \div 1{,}2$, или с избытком ацетилена ($\beta = 0{,}8 \div 1{,}0$), обеспечивающим компенсацию выгорающего углерода. Номер наконечника горелки выбирают так же, как для сварки стали, из расчета $V_a = (120 \div 150)\, s\, л/ч$, где V_a — часовой расход ацетилена в $л/ч$; s — толщина свариваемого чугуна в $мм$.

Применяется обычная газосварочная аппаратура. Когда сварка ведется с большим нагревом наконечника, рекомендуется использовать теплоустойчивые наконечники типа НТ конструкции ВНИИАВТОГЕНМАШ. Подготовка кромок под сварку может осуществляться: выплавкой дефекта газовой горелкой,

1. Схемы нагревательных устройств и их применение

Наименование нагревателя	Схема устройства	Применение
Печи конвейерные: *1* - нагреваемые детали; *2* - тоночная камера; *3* - сварочный стол; *4* - зона отжига; *5* - камера охлаждения		Массовое производство. Рекомендуется для литейных цехов автомобильных и тракторных заводов
Печи муфельные: *1* — рабочая площадка; *2* — нагревательная печь; *3* — кожух печи		Нагрев автомобильных блоков и других деталей на авторемонтных заводах
Печи электрические: *1* — нагреваемая деталь; *2* — кожух печи; *3* — съемная крышка; *4* — спирали		Общий подогрев деталей, требующих равномерного нагрева и охлаждения
Горны из сортового металла: *1* - подина горна; *2* — стенки		Нагрев деталей машиностроительного производства в сварочном отделении литейного цеха
Горны с открытым кожухом: *1* — горн; *2* — поддувало; *3* — подъемный кожух		Равномерный нагрев массивных деталей
Временное нагревательное устройство из огнеупорного кирпича: *1* — съемная крышка; *2* — нагреваемая деталь; *3* — временная кладка		Нагрев различных деталей при ремонтной сварке
Индукционный нагрев: *1* сварочный трансформатор; *2* - индуктор; *3* - дефектный участок, подготовленный к сварке; *4* — деталь		Местный или общий нагрев деталей при ремонтной сварке и исправлении дефектов

воздушно-дуговой или кислородно-флюсовой резкой, зубилом, сверлением, строжкой, фрезерованием и др.

В качестве присадки используют чугунные прутки марки А или марки Б (табл. 2). Сложные детали с тонкими стенками и мелкозернистой структурой

2. Состав чугунных прутков (ГОСТ 2671—70)

Марка	Содержание элементов в %							Примерное назначение
	C	Si	Mn	S, не более	P	Cr	Ni	
						не более		
А	3,0—3,5	3,0—3,4	0,5—0,8	0,08	0,2—0,4	0,05	0,3	Для горячей газовой сварки
Б		3,5—4,0			0,3—0,5			Для газовой сварки с местным нагревом и для электродных стержней

желательно варить прутками марки А. Сварку тяжелых отливок, где возможность образования отбеленных структур увеличивается, производят прутками марки Б, в которых увеличено содержание кремния. Подготовка прутка к сварке заключается в очистке его поверхности от земли, окалины и литейной корки.

Газовую сварку чугуна выполняют с применением флюса, который, взаимодействуя с металлом, нагретым до 700—900° С, очищает свариваемые поверхности от окислов и загрязнений, переводит тугоплавкие соединения в легкоплавкие; растворяет тугоплавкие окислы кремния, образуемые в сварочной ванне, путем взаимодействия его с содержащимся во флюсе углекислым натрием или калием. Кроме того, флюс увеличивает смачиваемость основного металла и растекаемость присадочного, а также предохраняет ванну от окисления путем создания пленки на поверхности расплавленного металла. Составы порошковых флюсов даны в табл. 3

3. Составы флюсов для сварки чугуна

Номер флюса	Составные части в %					
	Бура плавленая	Углекислый натрий	Азотнокислый натрий	Углекислый калий	Двууглекислый натрий	Окись кремния
1	100	—	—	—	—	—
2	50	—	—	—	47	3
3	56	22	—	22	—	—
4	23	27	50	—	—	—

Для сварки чугуна применяют также газообразные флюсы БМ-1 и БМ-2, представляющие собой летучие жидкости. Для подачи газообразного флюса в зону сварки используют специальный газо-флюсопитатель ФГФ-2-63, включаемый в ацетиленовую линию газовой горелки. Газообразный флюс позволяет применять чугунные прутки, изготовленные по упрощенной технологии, с добавкой ферросилиция в ковш при разливке; обеспечивает получение весьма плотного наплавленного металла, свободного от газовых пор и шлаковых включений; значительно ускоряет процесс; дает возможность автоматизировать процесс сварки.

Дуговая сварка

Ручная сварка. Может выполняться с общим или частичным подогревом. Применяется при устранении различных крупных дефектов литейного производства (недоливы, раковины, трещины). Ванна расплавленного металла при горячей сварке имеет значительный перегрев и обладает большой жидкотеку-

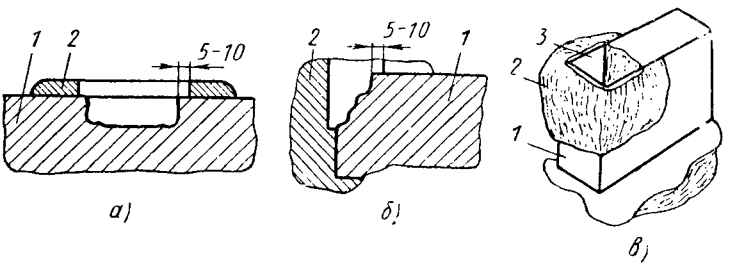


Рис. 1. Схемы формовок для горячей сварки чугуна: *а* — несквозной раковины; *б* — недолива края детали; *в* — облицовка формы графитовыми пластинами; *1* — деталь; *2* — формовка; *3* — графитовые пластины

честью. Обязательным условием подготовки завариваемого участка к сварке является формовка. Формовка может выполняться: угольными или графитовыми пластинами, плитками из огнеупорных материалов, формовочной землей, кварцевым песком и другими материалами.

Некоторые виды формовок даны на рис. 1. Составы формовочных масс приведены в табл. 4.

4. Составы для формовки изделий при горячей сварке чугуна

Компоненты	Содержание для составов в %			
	1	2	3	4
Формовочная земля	30	30	—	—
Белая глина	30	—	40	—
Кварцевый песок	40	50	10	85
Жидкое стекло	—	20	—	15
Графитовая мелочь	—	—	50	—

Примечание. Внутреннюю поверхность можно выкладывать графитовыми или угольными пластинами, соединяемыми на стыках формовочными массами.

Электроды для горячей сварки изготовляются из чугунных стержней марки А или Б (табл. 2).

В составы покрытия вводят вещества, стабилизирующие дугу и легирующие металл углеродом и кремнием. Толщина слоя покрытия обычно не превышает 0,15—0,20 *мм* на сторону. Некоторые наиболее употребительные составы покрытий даны в табл. 5.

Горячая сварка чугуна требует максимальных сварочных токов ($I_{св}$ = = 60 ÷ 100 *а* на 1 *мм* диаметра электрода). Род тока безразличен. Требуются источники тока, обеспечивающие нужную мощность дуги. Обычно рекомендуются: сварочные трансформаторы ТС-1000; ТС-2000 или два типа ТС-500, включенных на параллельную работу; генераторы постоянного тока ПС-500 и ПСМ-1000; сварочные выпрямители ВСС-500, ВПП-500 и ВПП-1000.

5. Составы покрытий чугунных электродов, применяемых для горячей сварки чугуна

Состав обмазки	Электроды			
	ОМЧ-1	ВЧ-3	Завода «Станколит»	ЭПЧ
Мрамор или мел	25	10	14	—
Графит	41	—	—	30
Ферромарганец Мп-1 или Мп-2	9	—	36	—
Полевой шпат	25	—	—	—
Ферросилиций 75%-ный	—	30	—	30
Карборунд	—	60	28	—
Плавиковый шпат	—	—	12	—
Маршалит	—	—	10	—
Ферротитан	—	—	—	15
Феррофосфор	—	—	—	10
Силикокальций	—	—	—	15
Жидкое стекло к сумме сухих компонентов	30- 35	30—35	30	30—35

Примечание. Все указанные обмазки наносятся на чугунные стержни марки А и Б, ГОСТ 2671—44.

Электрододержатель для горячей сварки должен обеспечивать хороший контакт с чугунным электродом, малый нагрев и хорошую защиту руки сварщика от теплового излучения. Применяют электрододержатели конструкции завода «Станколит» с приваркой чугунного электрода к стальному стержню (рис. 2).

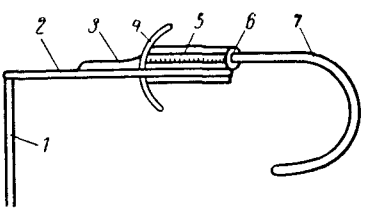


Рис. 2. Электрододержатель для горячей сварки: *1* — электрод; *2* — стальной стержень диаметром 12 мм; *3* — место приварки сварочного кабеля к стержню; *4* — тепловой щиток; *5* — рукоятка; *6* — кольцо; *7* — сварочный кабель

Сварка порошковой проволокой с предварительным подогревом позволяет устранить из процесса тяжелый ручной труд сварщика. Специальной аппаратуры для этого процесса в настоящее время нет. Можно использовать подающие механизмы автоматических или полуавтоматических установок, предназначенных для сварки под флюсом или в защитных газах. При монтаже установки необходимо предусматривать защиту головки и токоподвода от теплового излучения ванны. Для сварки рекомендуется порошковая проволока марки ППЧ-1.

Примерный состав проволоки и наплавленного металла дан в табл. 6. Учитывая, что проволока ППЧ-1 предназначена для холодной сварки чугуна, в ряде случаев состав ее можно скорректировать с целью некоторого уменьшения углерода и кремния в металле шва.

6. Химический состав порошковой проволоки ППЧ-1 и наплавленного металла

Материал	Химический состав					
	C	Si	Mn	Ti	Al	Fe
Порошковая проволока	6,5—7,0	3,8—4,2	0,4—0,6	0,4—0,6	0,7—1,0	Остальное
Наплавленный металл	4,5—5,5	3,5—4,2	0,5—0,9	0,3—0,6	0,5—0,8	То же

Сварка угольным или графитовым электродом по возможности маневрирования тепловым воздействием может быть сравнима с газовой сваркой. Отличием ее является: высокая температура, большая концентрация тепла, сложность защиты от излучения дуги и сложность заполнения ванны.

Рекомендуются следующие режимы сварки:

Толщина свариваемого металла в *мм*	Диаметр угольного электрода в *мм*	Сварочный ток в *а*
6—10	8—10	280—350
10—20	10—12	300—400
20—30	12—16	350—500
30 и более	16—18	350—600

В процессе сварки необходимо применять флюс в виде технической безводной прокаленной буры и флюс, состоящий из 23% технической прокаленной буры, 27% соды и 50% азотнокислого натрия. Правильно выполненное сварное соединение обладает механическими свойствами, структурой и химическим составом, свойственными серым литейным чугунам. По производительности способ дуговой сварки чугуна угольным электродом равноценен газовой сварке; по стоимости несколько дешевле.

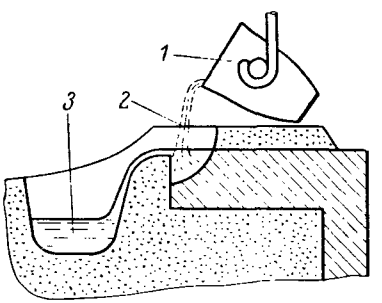


Рис. 3. Схема литейной сварки: *1* — ковш с жидким чугуном; *2* — завариваемый участок; *3* — слив жидкого металла

Термитная сварка и сварка промежуточным литьем

Термитная сварка является способом промежуточного литья. Тепло, нужное для нагрева кромок до температуры плавления, создается термитной струей, пропускаемой по свариваемым кромкам. После разогрева кромок разделка заливается жидким чугуном, так же полученным в термитной ванне. Способ широкого применения в промышленности не нашел.

Для горячей заварки дефектов крупного литья применяют способ, при котором место сварки разогревают струей жидкого чугуна, выливаемого из ковшей, и заливают — заваривают его жидким чугуном. Обычно для разогрева поверхности до начала плавления требуется вылить 6—10 объемов чугуна, требуемых для выполнения сварочных работ. Схема процесса представлена на рис. 3. Способ иногда применяют в литейных цехах для исправления больших недоливов на крупных отливках.

ХОЛОДНАЯ СВАРКА СЕРОГО ЧУГУНА

При холодной сварке чугуна общий или местный предварительный нагрев изделия исключается.

Существующие способы холодной сварки характеризуются следующими особенностями:

значительными внутренними напряжениями, возникающими в процессе сварки в свариваемой детали;

химическим составом и структурой металла шва, в большинстве случаев отличными от основного металла;

наличием в зонах термического влияния твердых структур, отсутствующих только в процессах сварки-пайки, где нет расплавления основного металла.

Газовая сварка

Сварка с расплавлением основного металла. Во многих случаях для заварки дефектов литья в ремонтных работах применяют газовую сварку на деталях, которые не требуют предварительного подогрева. В этом случае процесс можно условно отнести к холодной сварке, однако фактически здесь имеет место местный разогрев металла, неизбежный для образования ванны.

Газовую сварку применяют для устранения литейных дефектов и при ремонте деталей небольшого веса, а также при выполнении сложных ремонтных работ на ответственных изделиях. Разделка кромок под сварку производится пламенем сварочной горелки. Механическим воздействием чугунного прутка и газовым дутьем пламени выбирается фаска вдоль трещины, глубина которой определяется толщиной стенок. Такой способ удобен и прост в исполнении. В процессе выплавки дефекта происходит подогрев кромок, замедляющий охлаждение чугуна и устраняющий возможность отбеливания.

Заварку выполняют чугунным присадочным стержнем марки А или Б (ГОСТ 2671—70) с применением порошкообразного или газового флюса (БМ-1 или БМ-2).

Низкотемпературная сварка-пайка чугуна. Процесс образования сварного соединения методом сварки-пайки осуществляют при соблюдении следующих основных условий:

а) основной металл не подвергают плавлению. Кромки соединения нагревают до температуры плавления присадочного материала;

б) свариваемые кромки обрабатывают высокоактивными флюсами, которые обеспечивают очистку их от окислов и других загрязнений и хорошую растекаемость капли расплавленного присадочного металла по кромкам;

в) сварное соединение создается путем кристаллизации расплавленного присадочного металла на нагретых им микровыступах основного металла с образованием химических соединений между основным и присадочным металлом. При пайке мягким припоем наблюдается также затекание присадочного металла в микропоры основного.

В ряде случаев сварка-пайка обеспечивает получение сварного соединения с более высокими эксплуатационными свойствами, нежели обычное сварное соединение с расплавлением основного металла. Особенно рекомендуется этот метод для случаев, когда расплавление основного металла и перемешивание его с присадочным нежелательно, а также для соединения металлов, склонных к образованию хрупких закалочных структур в зонах термического влияния.

При низкотемпературной сварке чугуна с чугунной присадкой подготовленную поверхность под сварку нагревают пламенем газовой горелки до 720—750° С, наносят на нее флюс (табл. 8), расплавляют его и присадочный чугунный стержень (табл. 7), также покрытый флюсом. Расплавление стержня производится без плавления основного металла при нагреве кромок до 850° С.

Заполнение разделки производят непрерывно отдельными каплями, которые, попадая под флюс, растекаются по нагретым кромкам и обеспечивают надежное соединение.

7. Состав присадочных стержней для низкотемпературной сварки

Марка прутка[1]	Химический состав в %						
	C	Si	Mn	P	Ni	Ti	S
НЧ-1 НЧ-2	3,0—3,5	3,0—3,4 3,5—4,0	0,5—0,8	0,2—0,4	0,4—0,6	0,03—0,06	0,05

[1] НЧ-1 для тонкостенного литья; НЧ-2 для толстостенного литья

8. Составы флюсов для низкотемпературной сварки

Марка флюса	Бура плавленая техническая	Углекислый натрий	Азотнокислый натрий	Углекислый литий
ФНЧ-1	23	27	50	—
ФНЧ-2	18	25	56,5	0,5

Полностью заполненную присадочным металлом разделку прогревают 2—3 *мин* пламенем горелки, засыпают тонким слоем флюса, закрывают теплоизоляцией (асбест, сухой песок или угольная пыль) и охлаждают до нормальной температуры. Этот способ сварки предназначен для устранения литейных дефектов, обнаруженных в процессе механической обработки в различных изделиях, например, направляющие станин, рабочая поверхность цилиндров, поршней и другие поверхности, а также для заварки сквозных дефектов. Твердость сварного соединения равна твердости основного металла. Отбеленные зоны в основном и наплавленном металле отсутствуют. Наплавленный металл может подвергаться поверхностной закалке наравне с основным. Подготовка деталей под сварку производится механическим путем: рубкой, строжкой, фрезерованием, сверлением. Сварка выполняется нормальным ацетилено-кислородным пламенем. Возможно применение пропан-бутана, керосина, городского газа.

При низкотемпературной сварке-пайке чугуна с латунной присадкой полностью исключается необходимость общего предварительного подогрева изделия, имеющего любую степень жесткости. Процесс сварки-пайки идет в интервале температур 700—750° С. Способ полностью исключает возможность образования отбеленного слоя и может применяться для сварки в очень жестких контурах без опасения появления трещин. Для этого процесса ВНИИАВТОГЕНМашем разработан поверхностно активный флюс, состоящий из борной кислоты, углекислого лития и углекислого натрия, флюс имеет интервал рабочих температур флюсования 600—650° С и одновременно является индикатором температуры при нагреве детали. Высокая активность флюса позволяет получить хорошее облуживание чугуна латунью без выжигания поверхностных частиц графита. Применение этого способа сварки-пайки позволяет получать сварное соединение, более прочное, чем основной металл (чугун марки СЧ 18 36), и полностью избежать отбела чугуна в зоне сплавления основного и наплавленного металла. Недостаток способа — разный цвет основного и наплавленного металла.

9. Состав флюса ЗП-19 для пайки-сварки чугуна цинковым припоем

Компоненты флюса	Состав флюса в %
Хлористый цинк	39
Хлористый аммоний	40
Хлорное олово	8
Хлористый барий	4
Хлорная медь	9

При сварке-пайке чугуна цинковым припоем процесс протекает при нагреве места пайки до 300—350° С. Подготовка кромок такая же, как и при других способах. В качестве присадки применяют литые стержни следующего состава: цинк 92—94%; олово 5,5—7,5%; свинец 0,5%. Прочно-плотное соединение между чугуном и припоем создается благодаря образованию на границе между чугуном и сплавом цикатов железа. Последние должны находиться в виде тонких прослоек, так как при большой их толщине возрастает опасность получения хрупких составляющих в этой зоне. Величина слоя определяется длительностью нагрева и температурой. Процесс пайки должен протекать быстро и требует применения высокоактивного флюса (табл. 9). В процессе пайки флюс интенсивно ошлаковывает окислы, образуя легкоплавкие шлаки, которые всплывают на поверхность, а также увеличивает жидкотекучесть присадочного металла.

Флюс 311-19 пригоден для пайки-сварки чугуна, стали и цветных металлов пропан-бутан-кислородным и ацетилено-кислородным пламенем. В процессе пайки выделяется большое количество газов и аэрозолей, содержащих хлорные соединения. Пайку можно проводить только при наличии местного отсоса газов.

Дуговая сварка

Для способов дуговой сварки, выполняемых без нагрева деталей, рекомендуются следующие технологические приемы:

1. Деталь к сварке подготавливают механическими способами — рубкой, строжкой, фрезерованием, сверлением и др. Огневую разделку не применяют.

2. Сварку выполняют электродами диаметром 3—4 *мм* с малой погонной энергией. Режим сварки и техника выполнения шва должны обеспечить минимально возможную глубину расплавления основного металла (0,5—2 *мм*). Порядок наложения швов выбирают так, чтобы тепло было рассредоточено по всей наплавляемой поверхности. Нагрев детали в непосредственной близости от шва не должен превышать 100—150° С. После наложения каждого валика дается время на остывание места сварки до температуры ниже 100° С.

3. В некоторых случаях рекомендуется послойная проковка шва типа чеканки, которая уплотняет металл, снимает внутренние напряжения, уменьшает пористость и обеспечивает герметичность сварного соединения.

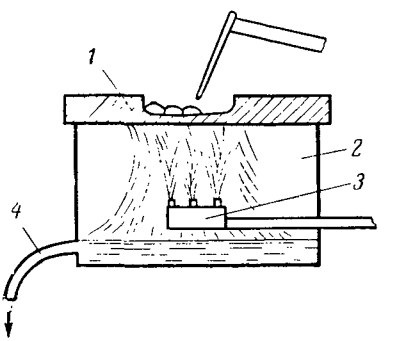


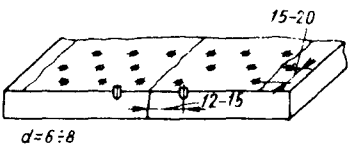
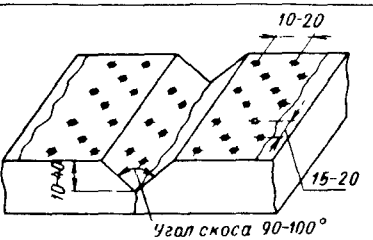
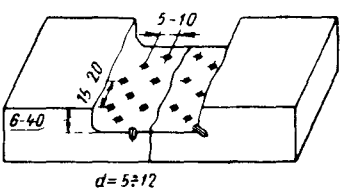
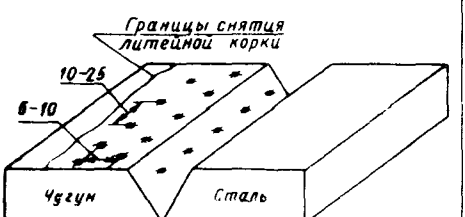
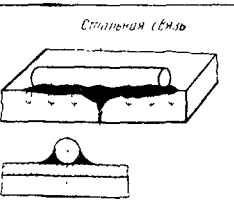
Рис. 4. Схема заварки тонкостенных деталей с водяным охлаждением: *1* — завариваемая деталь; *2* — водяная камера; *3* — водяной душ; *4* — слив воды

Ручная сварка стальными электродами применяется для заварки незначительных дефектов чугунного литья на неответственных необрабатываемых деталях. Для этих целей рекомендуются электроды типа Э-34 (ГОСТ 9467—60) с тонким ионизирующим покрытием. Сварку желательно вести с максимальным отводом тепла от детали. Завод «Станколит» для этих целей применяет охлаждение завариваемой детали водяным душем (рис. 4).

Для ремонта тяжелых и сложных деталей применяют стальные электроды типа Э-42; Э-42а; Э-46, Э-46а, Э-50 и Э-50а с фтористо-кальциевым покрытием типа Ф (ГОСТ 9467—60). Рекомендуются электроды УОНИ-13/45 и УОНИ-13/55. Ими можно восстанавливать большие разрушения в тяжелых станинах дизелей, прессов, молотов, корпусах турбин и другом оборудовании. В ряде случаев сварку удается выполнять без демонтажа оборудования в различных пространственных положениях шва. Наиболее слабой зоной сварного соединения является переходная, где неизбежно образуются твердые и хрупкие структуры.

Для устранения связи между металлом сварного соединения и основным металлом при ремонте иногда ставят стальные шпильки, которые в случае равномерной работы со сварным соединением могут увеличить работоспособность шва. Однако, как показывают многочисленные примеры выполнения сварки со шпильками, в случаях, когда сварная чугунная деталь испытывает в эксплуатации более или менее значительные нагрузки, из-за неравномерного нагружения разрушаются и шпильки и сварное соединение. Схема расстановки шпилек дана в табл. 10. Заварку такого соединения выполняют в следующей последовательности. Сваривают шпильки и наплавляют на поверхность чугуна стальное покрытие. Эту операцию выполняют электродами диаметром 4 *мм*, на постоянном

10. Способы подготовки кромок, постановки шпилек и усиления сварного соединения стальными связями

Характер ремонта и вид сварного соединения	Толщина металла в мм	Эскиз
Заварка трещин на необрабатываемых и несопрягаемых поверхностях	10—25	
Заварка трещин на необрабатываемых поверхностях	10—100	
Заварка трещин на обрабатываемых и сопрягаемых поверхностях	12 и более	
Приварка чугуна к стальным вставкам	12—60	
Сварное соединение, усиленное стальными связями	—	

ноке обратной полярности; сила тока 120—130 *а*. Сварку ведут с минимально возможной глубиной проплавления основного металла. Наплавленные части сваривают электродами, участками длиной 40—50 *мм*. После заполнения разделки заваренный участок обычно усиливают приваркой круглых стальных связей, которые располагают поперек шва. Такое сварное соединение, армированное стальными связями, работает более надежно, чем соединение с одними шпильками. Схема заварки этим способом клапанных перемычек в цилиндрах аммиачных компрессоров дана на рис. 5.

В некоторых случаях накладывают отжигающий валик. Сварка ведется стальными электродами со стабилизирующим покрытием. Валик накладывают длиной 40—50 *мм*, не обрывая дуги, его перекрывают вторым слоем так, чтобы

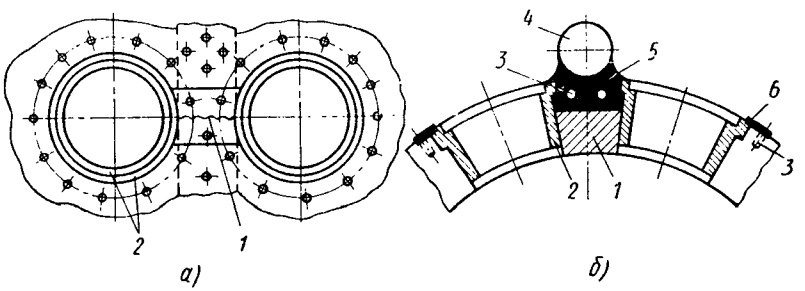


Рис. 5. Схема заварки клапанных перемычек в аммиачных цилиндрах: *а* — перемычка и клапанные отверстия, подготовленные под сварку; *б* — сечение заваренной перемычки; *1* — часть перемычки, оставленная без сварки; *2* — стальные втулки; *3* — шпильки в заварке; *4* — стальная усиливающая перемычку связь; *5* — наплавленный металл; *6* — шов, соединяющий стальные втулки с чугуном

при этом чугун не расплавлялся. Такой способ позволяет резко уменьшить в сварном соединении твердость переходной зоны. Остаются отдельные твердые включения, которые могут быть обработаны твердосплавным инструментом. Способ может быть рекомендован для ремонта тонкостенных чугунных деталей автотракторного и сельскохозяйственного оборудования.

Сварка стальными электродами с карбидообразующими элементами в покрытии. Отделом сварки ЦНИИТМАШ разработан специальный электрод марки ЦЧ-4, предназначенный для сварки высокопрочных и обычных серых чугунов, дающий в наплавленном металле легированный сплав по твердости, приближающейся к твердости обычного машиностроительного чугуна. Электроды изготовляют из проволоки Св-08 или Св-08А (ГОСТ 2246—60*) и покрывают специальной обмазкой, содержащей нужное количество карбидообразующих элементов, которые обладают бо́льшим сродством к углероду, чем железо. Получаемые карбиды не растворяются в железе и имеют малую твердость. Наплавленный металл хорошо обрабатывается нормальным режущим инструментом. В переходных зонах, особенно при сварке массивных деталей, встречаются отдельные твердые включения, которые могут быть обработаны твердосплавным инструментом. Химический состав наплавленного металла следующий (в %):

C	Si	Mn	V	S	P
≤ 0.15	≤ 0,6	≤ 0.5	8,50—10,5	≤ 0,04	≤ 0.04

Механические свойства сварных соединений приведены в табл. 11. Электроды предназначаются для заварки дефектов на обрабатываемых скользящих поверхностях, трещин, отколов. В ремонтных работах при заварке значительных дефектов рекомендуется этими электродами наплавлять чугунные поверхности в два слоя, а затем заполнять разделку стальными электродами типа Э-42,

Э-42А. Сварка ведется на минимальном токе (23—30 *а* на 1 *мм* диаметра электрода).

11. Механические свойства сварных соединений, выполненных электродами ЦЧ-4

Основной металл	Предел прочности при разрыве	Предел текучести	Предел прочности при изгибе	Ударная вязкость в *кГм/см²*	Относительное удлинение в %	Твердость наплавленного металла *НВ*
	в *кГ/мм²*					
Серый чугун СЧ 32-62	31,3—34,5	—	51,7—54,1	—	1,6—2,0	—
СЧ 15-32	16,8—19,4	—	32,5—33,0	—	—	—
Высокопрочный чугун ВЧ 40-5	41,2—40,9	26,3—30,6	—	—	12,7—19,5	—
Металл шва	49,6—51,2	21,3—29,1	—	3,8—4,2	29,7—30,5	170—180

При холодной сварке чугуна находят применение также электроды АПЧ 1. Эти электроды имеют стержень из проволоки марки Св-0Х18Н9, на который методом протяжки надета медная оболочка толщиной 0,75 *мм*. На электрод наносят покрытие основного типа, состоящее из мрамора 40%, плавикового шпата 30%, песка кварцевого 17%, ферромарганца 5%, ферросилиция 8%. Для электрода диаметром 3,5 *мм* толщина слоя покрытия составляет 0,3—0,4 *мм* на сторону. Сварка ведется короткими швами длиной 30—40 *мм* с обязательной проковкой каждого слоя. Электроды обеспечивают нужную прочность сварного соединения, но от подкалки в переходных зонах полностью не избавляют. Они рекомендуются для различных ремонтных работ на поверхностях, не работающих на скользящее трение.

Сварка электродами из цветных металлов. Электроды из цветных металлов позволяют получить сварное соединение, обрабатываемое обычным режущим инструментом. Значительно сложнее избежать отбеленных переходных зон, так как наложение валика на холодную деталь неизбежно ведет к быстрому отводу тепла. В переходной зоне участок металла, нагретый до температуры плавления и затем быстро охлажденный, образует твердый закаленный слой отбеленного чугуна. Величина и характер переходной зоны при сварке электродами из цветных металлов существенно отличаются от этой же зоны, образуемой при сварке стальными электродами. Основное отличие заключается в отсутствии диффузии углерода основного металла в шов. В некоторых случаях при выполнении многослойных швов и правильно выбранных режимах сварки (при малой погонной энергии дуги) на изделиях с небольшой толщиной стенки удается получить сварное соединение, обрабатываемое по всему сечению.

Сварное соединение чугуна, выполненное медно-железным электродом, представляет собой механическую смесь меди и железоуглеродистого сплава, соединенных с основным металлом общими кристаллами стали, а также путем частичной диффузии меди в микропоры чугуна. Такой характер соединения определяется тем, что медь и железо практически взаимно нерастворимы. Теоретически растворимость меди в железе равняется 0,1%. Структура металла шва представляет собой двухфазную систему, состоящую из железоуглеродистого сплава, насыщенного медью, и медной составляющей. Обрабатываемость шва зависит от соотношения меди и железа в электроде. С увеличением содержания железа растет количество углерода, диффундирующего из расплавленного чугуна и способствующего повышению твердости металла шва.

Существует несколько типов медно-железных электродов: медный стержень с оплеткой из жести, покрытый тонкой стабилизирующей обмазкой; медный стержень в железной трубке со стабилизирующей обмазкой; электрод из биметаллической проволоки; пучок из медных и стальных электродов; медный стержень

с обмазкой основного типа (мрамор, плавиковый шпат), в которую введен железный порошок (электроды ОЗЧ 1).

Все перечисленные электроды, кроме ОЗЧ-1, не изготовляют механизированным способом.

Электроды ОЗЧ-1 дают наплавленный металл с равномерным распределением железа в медной основе. Он обладает большой вязкостью, хорошо поддается проковке и легко обрабатывается. Состав обмазки: железный порошок 50%; мрамор 27%; плавиковый шпат 7,5%; ферромарганец 2,5%; ферросилиций 2,5%; ферротитан 6,0%; сода 0,5%. Стержень электрода из меди марки М-1, М-2, М-3, диаметром электрода 3; 4 и 5 *мм*. Сварка ведется на постоянном токе при обратной полярности. Для электрода диаметром 3 *мм* рекомендуется ток 90—120 *а*; 4 *мм* 120—140 *а*; 5 *мм* 160—190 *а*.

Разделку под сварку выполняют механическим путем. Сварку производят участками длиной 30—50 *мм* в несколько слоев с тщательной проковкой каждого слоя. Наплавленный металл после проковки обладает достаточной прочностью и плотностью. Эти электроды дают хорошие результаты при заварке трещин в водяных рубашках двигателей внутреннего сгорания и деталях станков.

Другие медно-железные электроды дают менее устойчивые результаты. Объясняется это тем, что железо в медной составляющей сплава распределяется неравномерно, крупными участками, что ведет к уменьшению пластичности. Следует иметь в виду, что медно-железные электроды не могут быть рекомендованы для проведения массовых сварочных работ ввиду их дефицитности и токсического действия содержащих медь аэрозолей на организм сварщика. Рациональное применение эти электроды находят в сочетании со стальными, когда ими выполняют те участки шва, где стальные электроды не дают удовлетворительных результатов, например, в местах, где требуется последующая механическая обработка.

Следует также учитывать, что хорошие результаты сварки получаются при тщательной проковке и чеканке швов, поэтому в местах, где проковка невозможна или загруднена, применять медно-железные электроды нецелесообразно.

В производстве применяют различные электроды, содержащие никель в сочетании с медью. Как правило, такие электроды используют главным образом для заварки литейных дефектов, обнаруживаемых в процессе механической обработки чугунного литья на рабочих поверхностях, где местное повышение твердости недопустимо.

Положительные свойства таких сплавов заключаются в том, что никель и медь не растворяют углерода и не образуют структур, способных увеличить твердость после нагрева и быстрого охлаждения. В то же время никель и железо обладают неограниченной растворимостью и образуют прочное и надежное соединение. При сварке чугуна этими сплавами отсутствует перемещение углерода из зоны термического влияния в шов; отбел переходной зоны значительно меньше, чем при сварке стальными или медно-железными электродами, а в ряде случаев полностью отсутствует.

Для изготовления электродов применяют медно-никелевые и железо-никелевые сплавы. Первые применяют давно. К ним относятся сплавы типа «Монель», содержащие 65—75% никеля, 27—30% меди, 2—3% железа, 1,2—1,8% марганца и 0,1—0,3% магния; типа мельхиор — 80% меди, 20% никеля, константан и др.

Недостатком этих сплавов является большая литейная усадка, в несколько раз большая, чем у чугуна. Это ведет к образованию трещин в наплавленном металле, которые возникают главным образом в момент затвердевания шва (горячие трещины). Такие мелкие надрывы, расположенные по границам кристаллов, иногда имеют характер сплошной сетки и резко снижают прочность сварного соединения. В связи с этим указанные сплавы не могут быть рекомендованы для заварки трещин в изделиях, которые несут силовую нагрузку. Заварка отдельных мелких раковин объемом 10—12 $см^3$ дает хорошие результаты, так как обеспечивает возможность последующей механической обработки.

Технология сварки медно-никелевыми электродами определяется следующими основными приемами: минимально возможной глубиной расплавления основного металла, составляющей не более 0,5—2,0 *мм*; наложением тонких швов с малым объемом металла при длине шва, не превышающей 40—60 *мм*; тщательной проковкой швов, выполняемой непосредственно после наложения шва по горячему металлу.

Применяют также электроды со стержнем из монель-металла и фтористо-кальциевым покрытием с добавкой различных ферросплавов; их используют для заварки различных дефектов на обработанных поверхностях. Выпускаемые для промышленности электроды марки МНЧ-1 имеют покрытие основного типа. В качестве стержня применяют проволоки двух марок: НМЖМц 28-2,5-1,5 (монель) или МнМц 40-1,5 (константан). Сварку выполняют постоянным током обратной полярности возможно короткой дугой. Длина участка 15—20 *мм*. Каждый участок сразу же, после обрыва дуги, проковывают до уничтожения рисунка шва. Рекомендуются режимы тока: для электрода диаметром 3 *мм* 90—110 *а*, 4 *мм* — 120—140 *а*; 5 *мм* — 160—190 *а*. Сварное соединение можно обрабатывать обычным режущим инструментом.

Железо-никелевые электроды обычно содержат в стержне 40—60% никеля и 60—40% железа. Такие сплавы дают хорошее соединение с чугуном. Они обеспечивают высокую прочность и некоторую вязкость сварного соединения. Отсутствие меди делает этот сплав более однородным и плотным. Железоникелевые сплавы имеют ряд технологических преимуществ перед сплавами типа монель. К их числу нужно отнести: большую прочность и вязкость, меньшую усадку, одноцветность наплавки с чугуном, почти полное отсутствие твердых структур в переходных зонах. Железо-никелевые сплавы практически почти не растворяют в себе углерод, и поэтому диффузия этого элемента из зоны термического влияния полностью исключается. Для сварки высокопрочного чугуна разработаны электроды марки ЦЧ-3 и ЦЧ-3А. Они дают также хорошие результаты и при сварке обычных серых чугунов. Покрытие электродов основного типа. Сварку выполняют постоянным током обратной полярности. Наплавленный металл обладает хорошей обрабатываемостью и плотностью.

Все электроды, содержащие никель, дефицитны и могут применяться для сварки чугуна ограниченно, например, для заварки небольших раковин, вскрытых на последних операциях механической обработки, в деталях больших габаритов и большой жесткости.

Сварка порошковой проволокой. Углерод, введенный в проволоку в виде порошка, образует при ее плавлении многочисленные центры кристаллизации. Это способствует получению обрабатываемого металла шва. Состав проволоки и наплавленного металла приведены в табл. 6. Сварку чугуна порошковой проволокой выполняют постоянным током обратной полярности. Для проволоки диаметром 3 *мм* сила тока составляет 250—280 *а*.

Получение наиболее плотного металла шва достигается защитой дуги и сварочной ванны углекислым газом. Процесс может выполняться на любом полуавтомате, предназначенном для сварки плавящимся электродом. Применение дуговой сварки в защитном газе должно значительно ускорить выполнение сварочных работ по устранению различных дефектов литейного производства, а также при массовых ремонтных работах. Когда сварку или наплавку выполняют в жестком узле изделия, необходим предварительный подогрев, температуру которого устанавливают опытным путем в пределах 250—450° С.

ОСОБЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ

Контактная сварка. В последнее время в промышленности находит применение контактная стыковая сварка чугунных труб и стержней. Сварка стыков труб дает возможность получать комбинированные чугунные трубы, к концам которых приварены стальные кольца, а также выполнять соединения стыков

чугунных труб для получения различных фасонных частей. Сварка выполняется методом оплавления. При сварке чугуна со сталью необходимо учитывать различие в электрическом сопротивлении чугуна и стали, устанавливая соответственную величину вылета концов труб в зажимах сварочного аппарата.

Сварка ведется на мягких режимах при длительном времени оплавления с применением повышенного давления, особенно при окончании процесса. Это необходимо для удаления из стыка жидкого металла и получения сварного соединения, свободного от отбеленного чугуна. После сварки можно применять термическую обработку стыка в контактах сварочной машины для улучшения структуры и снятия внутренних напряжений.

Сварка трением обеспечивает получение работоспособного сварного соединения и может найти промышленное применение для сварки стержней, стыков труб и других тел вращения. Этим способом можно также сваривать чугун со сталью, медью, латунью и бронзой. Такие соединения находят применение в различных областях машиностроения.

Диффузионная сварка чугунных изделий может применяться для соединения различных чугунных деталей между собой, а также чугуна с медью, латунью, сталью, титаном и неметаллическими материалами, например керамикой. Процесс ведется при 700—800° С в вакуумной камере, поэтому максимальные размеры свариваемых деталей определяются размерами последней; структурных изменений в чугуне в месте сварки, как правило, не наблюдается.

Для получения нормального соединения требуется создание вакуума до 10^{-3} *мм рт. ст.*

СВАРКА ВЫСОКОПРОЧНОГО И КОВКОГО ЧУГУНА

Сварка высокопрочного модифицированного чугуна. Высокопрочный чугун обладает худшей свариваемостью, чем обычный серый чугун. Это объясняется повышенной склонностью его к отбеливанию, большей прокаливаемостью вследствие сфероидальной формы графита и способностью магния увеличивать скорость образования цементитных включений.

Горячая газовая сварка высокопрочного чугуна требует предварительного нагрева до 700—750 С и остывания после сварки со скоростью не более 75 С/ч. При таком режиме последующей термической обработки заваренной детали не требуется. Если нагрев детали не превышает 600° и скорость остывания не больше 100° С/ч, для получения нужных прочностных свойств и твердости необходим высокотемпературный отжиг при нагреве до 950° С, выдержке в течение 3 *ч* и остывании с печью.

12. Режимы газовой сварки высокопрочных чугунов

Толщина чугунной детали в месте сварки в *мм*	Расход ацетилена в *л/ч*	Номер сменных наконечников горелки
До 5	500	3
5–10	750—1200	4—5
10–15	1200–1700	5–6
15 и более	1700—2500	6–7

Присадочные стержни изготовляют из модифицированного чугуна, обработанного магнием или церием. Магниевый чугун должен иметь следующий состав в %: 3,3—3,8 С; 3,5—4,0 Si; 0,07—0,14 Mg; ≤0,45 Mn; ≤0,07 P, ≤0,05 Cr; ≤ 0,03 S; ≤0,5 Ni.

Стержни отливают длиной 350—450 *мм*, диаметром 6—12 *мм*. Для сварки могут быть применены те же порошкообразные флюсы, что и для газовой сварки обычных серых чугунов. Особым требованием является полное отсутствие влаги.

Вследствие повышенной теплопроводности чугуна нужно несколько увеличивать мощность пламени. Примерные режимы даны в табл. 12. Пламя должно быть нормальным или с небольшим избытком ацетилена. Подготовка дефекта под сварку должна выполняться механическим путем. На нагретую горелкой до 750° С поверхность наносят флюс, после чего температуру поверхности

повышают до температуры плавления чугуна. Сварку выполняют с минимальной глубиной проплавления. Присадочный стержень должен быть погружен в сварочную ванну, пламя горелки направляют на стержень, который круговыми движениями перемещают по свариваемым кромкам.

Холодная дуговая сварка высокопрочных чугунов производится электродами марки ЦЧ-4 (см. стр. 295).

Наплавленный металл хорошо сваривается с высокопрочным чугуном и образует сварное соединение, обеспечивающее нужные механические свойства (см. табл. 11). Оно обрабатывается обычным режущим инструментом. Поверхности под сварку подготавливают только механическими способами, очищая по контуру от литейной корки на ширину 10—20 *мм* до чистого металла. Сварку выполняют постоянным током обратной полярности (возможно применение переменного тока с минимальной глубиной проплавления основного металла).

Первые слои рекомендуется наносить на следующих режимах:

Диаметр электрода в *мм*	3	4	5	6
Сварочный ток в *а*	65–80	90—120	130–150	150—170

Электрод перемещают по схеме «полумесяца» с шириной шва 5—6 диаметров электрода.

Для заварки больших дефектов, когда объем наплавленного металла велик, рекомендуется после наложения двух слоев окончательное заполнение разделки проводить электродами УОНИ-13/45 или УОНИ-13/55. Для сварки могут использоваться и железоникелевые электроды марки ЦЧ-3А.

Сварка ковкого чугуна. Заварка дефектов в ковком чугуне может выполняться в двух случаях: 1) после отливки, до термической обработки; 2) после термической и механической обработок. Заварке подвергают раковины, трещины, шлаковые засоры.

Дефекты, обнаруженные до термической обработки, разделывают под сварку механическими способами, главным образом абразивным инструментом. Заварку выполняют преимущественно дуговой сваркой обычными стальными электродами с покрытием фтористо-кальциевого типа (например, УОНИ-13/45 и УОНИ-13/55 или У-340/105). В этом случае после термической обработки наплавленный металл по химическому составу будет отличаться от основного металла, но механическим свойствам — близок к нему.

Заварка дефектов, обнаруженных после термической обработки, в процессе механической обработки или в процессе эксплуатации может выполняться дуговой сваркой стальными электродами типа УОНИ-13/45 или УОНИ-13/55, а также специальными электродами ЦЧ-4 и железо-никелевыми электродами типа ЦЧ-3А или газовой пайкой с применением латунной присадки ЛОК-59-1-03 или Л-62 (главным образом при декоративной заделке дефектов).

УСТРАНЕНИЕ ЛИТЕЙНЫХ ДЕФЕКТОВ

Дефекты, обнаруженные в литейных цехах, желательно устранять горячей дуговой сваркой с чугунной присадкой. Дать точные рекомендации по выбору способа сварки для устранения дефектов, обнаруженных на первой стадии механической обработки, крайне затруднительно. Некоторые общие сведения приведены в табл. 13.

Устранение дефектов, вскрытых на последней стадии механической обработки, когда изменение размеров детали недопустимо, является самой сложной и трудновыполнимой сварочной операцией. В этих случаях можно рекомендовать следующие способы заварки:

а) газовую сварку-пайку чугунной присадкой типа НЧ-1, НЧ-2 для поверхностей, когда завариваемое место обязательно должно иметь состав чугуна. В ряде случаев при заварке в очень жестких узлах рекомендуется общий или

13. Рекомендуемые способы заварки дефектов, вскрытых на первой стадии механической обработки в чугунных деталях ответственного назначения

Дефекты	Требования, предъявляемые к исправляемому участку	Рекомендуемые способы сварки
Раковины, шлаковые засоры больших размеров и пористость на больших площадях	Заваренный участок подвергается механической чистовой обработке для скользящего и сопрягаемого трения	Горячая газовая и дуговая с общим местным нагревом и применением присадочного металла, дающего в наплавке чугун
Раковины и шлаковые засоры малого размера, незначительная пористость	То же	Газовая сварка-пайка чугунной или латунной присадкой. Электродуговая сварка электродами ЦЧ-4, ОЗЧ-1, ЦЧ-3А и другими этих типов
То же	Завариваемая плоскость подлежит последующей термической обработке, например поверхностной закалке	Газовая сварка-пайка чугунной присадкой НЧ-1, НЧ-2 в очень жестких контурах, предварительный общий или местный подогрев детали

местный подогрев изделия до 300—350° С. При таком нагреве размеры деталей обычно не изменяются;

б) газовая сварка-пайка латунной присадкой, когда это допустимо по техническим условиям. В этом случае гарантируется полная плотность, равнопрочность и хорошая обрабатываемость. Наплавленный металл отличается от основного цветом и в некоторых случаях твердостью;

в) дуговая заварка электродами ЦЧ-4, дающими в наплавленном металле специальный сплав. В некоторых случаях возможно повышение твердости в зонах термического влияния и появление трещин в металле шва при заварке в очень жестких узлах;

г) дуговая сварка электродами, содержащими никель (например, электроды ЦЧ-3А и другие этого типа). Для заварки мелких раковин можно применять электроды с медно-никелевыми стержнями марки МНЧ-1.

РЕМОНТНЫЕ РАБОТЫ ПО ВОССТАНОВЛЕНИЮ ДЕТАЛЕЙ

Эти работы по характеру выполнения можно разделить на две группы:

1. Массовые однотипные работы, выполняемые ремонтными заводами и цехами на изделиях, подлежащих плановому ремонту. Примером могут служить блоки автомобильных и тракторных двигателей, детали подвижного состава железнодорожного транспорта, различное станочное оборудование, детали подъемно-транспортных механизмов и др.

Ремонт проводится по заранее разработанной и проверенной в эксплуатации технологии с оснасткой рабочих мест нужными приспособлениями и нагревательными устройствами. В качестве примера можно привести заварку трещин в клапанных перемычках блоков тракторных и автомобильных двигателей. Сварку выполняют газовой горелкой с применением чугунной присадки. Рабочее место оборудовано подъемным устройством и термоизоляционным кожухом, в который помещают перед загрузкой в печь завариваемый блок. Нагретый до 400—450° С блок вместе с кожухом вынимают краном из печи и устанавливают на рабочий стол сварщика. Сварщик заваривает трещины через откидываемые окна кожуха, расположенные в местах их образования, после чего блок с кожухом вторично загружают в печь для медленного охлаждения. Такая технология позволяет восстанавливать блоки в 80—90% случаев без возникновения внутренних напряжений и трещин.

Для сварки деталей этой группы, учитывая массовый характер производства, следует рекомендовать способы, которые обеспечивают нужные эксплуатационные свойства без применения дефицитных сплавов и цветных металлов, содержащих медь и никель. В ряде случаев простое нагревательное устройство позволяет применять газовую сварку с чугунной присадкой и получать высокое качество восстановленной детали. В качестве горючего газа можно применять недефицитные сжиженные пропан-бутановые смеси. В случае заварки крупных дефектов можно рекомендовать полуавтоматическую дуговую сварку порошковой проволокой.

2. Работы по восстановлению различных чугунных деталей, вышедших из строя, вследствие аварийных разрушений. Поломки чугунных деталей, например: шестерен, маховиков, станин эксцентриковых прессов, различных шатунов, прижимов, ползунов и др., происходящие вследствие нарушения технологии или внезапных перегрузок, — явление, достаточно частое на производстве. Такие ремонтные работы по способу производства сварки могут быть разбиты на две группы:

1) детали весом до 1500—2000 *кг*, которые могут быть легко демонтированы и установлены на место после сварки. В этом случае допустим общий или местный нагрев отливки без опасности изменения основных размеров изделия. Заварку таких отливок рекомендуется выполнять газовой сваркой с применением чугунных присадочных стержней. Заваренное место легко обрабатывается любым металлорежущим инструментом. Восстановленная деталь имеет работоспособность, такую же как и вновь изготовленная;

2) детали, местный или общий нагрев которых нежелателен, а демонтаж и монтаж оборудования затруднений не встречает. Восстановление таких деталей можно выполнять сваркой с применением медно-железных (ОЗЧ-1) или железо-никелевых (ЦЧ-3А) электродов. Заварка небольших повреждений может производиться стальными электродами типа ЦЧ-4. В этих случаях также рекомендуются медно-железные электроды ОЗЧ-1, железо-никелевые ЦЧ-3А, специальные стальные электроды и электроды с покрытием УОНИ-13/45 и УОНИ-13/55. В некоторых случаях дуговая сварка стальными электродами производится с постановкой стальных шпилек. Процесс сварки во всех случаях производится участками без нагрева чугунного изделия до температур, превышающих 100° С, электродами малых диаметров, при малой плотности тока.

Следует отметить, что выполнение этих работ требует особенно высокой квалификации сварщика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аснис А. Е., Латаш Ю. В. Сварка чугуна. М., Машгиз. 1959.
2. Батманов В. А. Сварка в ремонте оборудования. Вып. I. «Сварка чугуна». М., Машгиз.
3. Вощанов К. П. Сварка чугуна. Общественный университет ЦП НТО Машпром, М., 1959.
4. Вощанов К. П. Сварка чугуна (обзор). ГНТК СССР, ЦБТИ, М., 1961.
5. Гиршман В. А. Низкотемпературная заварка дефектов чугунного литья. «Сварочное производство», 1963, № 9.
6. Иванов Б. Г. Исправление дефектов чугунного литья. М., Машгиз, 1955.
7. Иванов Б. Г. Опыт восстановления сваркой чугунных отливок металлорежущих станков. «Сварочное производство», 1963, № 6.
8. Иванов Б. Г. и Журавицкий Ю. И. Присадочные материалы для сварки чугуна. «Сварочное производство», 1963, № 6.
9. Скульский Ю. В. Контактная стыковая сварка высокопрочного чугуна со сталью. «Автоматическая сварка», 1963, № 12.
10. Скульский Ю. В. Машины для контактной сварки узлов из чугунных труб. «Автоматическая сварка», 1963, № 11.
11. Суденков Е. Г. и Моисеев В. Н. Диффузионная сварка чугуна со сталью. «Автоматическая сварка», 1963, № 1.
12. Справочник молодого сварщика. М., Профтехиздат, 1963.
13. Сборник «Газопламенная обработка металлов». Под ред. Д. Л. Глизманенко. М., Профтехиздат, 1962.
14. Шебеко В. А. Сварка чугуна (Производственный опыт). М., Машгиз, 1957.

ГЛАВА XI

СВАРКА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

КОНТАКТНАЯ СВАРКА АЛЮМИНИЕВЫХ И МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ [1]

Точечная и роликовая сварка

Особенности сварки

Точечную и роликовую сварку легких сплавов целесообразно применять для соединения деталей толщиной от 0,3 + 0,3 до 7,0 + 7,0 *мм*.

Вследствие высокой теплоэлектропроводности легких сплавов и резкого снижения прочности при нагреве для сварки используют кратковременные включения тока большой величины (20—150 *ка*). В процессе кристаллизации зоны расплавления вследствие усадки металла возникают внутренние растягивающие напряжения, в связи с чем могут образовываться раковины, поры и трещины. Эти дефекты особенно характерны для сварных соединений сплавов с широким температурным интервалом кристаллизации (Д16АТ, В95АТ и др.). Для предотвращения указанных дефектов во время кристаллизации увеличивают усилие сжатия электродов (прикладывают ковочное усилие), которое компенсирует растягивающие напряжения, вызванные усадкой, соответствующей деформацией металла, окружающего литое ядро. Наиболее эффективно сочетать ковочное усилие с подогревом металла зоны сварки плавно снижающимся током.

Роликовая сварка выполняется с прерывистым вращением роликов, при котором сварочный ток протекает при неподвижных роликах, а перемещение деталей происходит во время паузы. В этом случае отсутствует перегрев в контакте ролик — деталь, снижается деформация нагретого металла шва, вследствие чего уменьшается налипание металла на поверхность роликов и улучшается охлаждение зоны сварки. Сварка и охлаждение металла при неподвижных роликах улучшают условия обжатия кристаллизующегося металла шва усилием сжатия и тем самым способствуют устранению дефектов усадочного характера (поры, раковины, трещины). Однако при невысокой скорости перемещения деталей качественная сварка возможна и при непрерывно вращающихся роликах.

Точечной и роликовой сваркой соединяют детали из листа, профиля, а также полученные резанием с шероховатостью поверхности не ниже 6-го класса по ГОСТу 2789—59. Рекомендуемые размеры точечных и роликовых соединений приведены в табл. 1.

Роликовую сварку используют для герметичных соединений. Для повышения их надежности применяют двухрядные швы с перекрытием 30—50%. Желательно, чтобы соотношение толщин свариваемых деталей было не более 3 : 1.

---

[1] Сварка алюминиевых и магниевых сплавов плавлением в среде защитных газов достаточно подробно рассмотрена во II томе «Справочника по сварке». Поэтому в данной главе приводятся данные по их контактной сварке.

1. Размеры точечных и роликовых соединений алюминиевых и магниевых сплавов в мм

Толщина тонкой детали в соединении	Точечная сварка					Роликовая сварка		
	Диаметр ядра	Минимальная нахлестка при шве		Шаг между точками	Расстояния между рядами точек	Ширина литой зоны	Минимальная нахлестка	
		однорядном	двухрядном				Шов однорядный	Шов двухрядный (перекрытие швов 30–50%)
0.3	2.5—3.5	8	15	8	7	2.5—3.5	8	11
0.5	3.0—4.0	10	19	10	9	3.0—4.0	10	13
0.8	3.5—4.5	12	23	13	11	3.5—4.5	12	16
1.0	4.0—5.0	14	27	15	13	4.0—5.0	14	18
1.2	5.0—6.0	16	29	15	13	5.0—6.0	16	20
1.5	6.0—7.0	18	35	20	17	6.0—7.0	18	23
2.0	7.0—8.0	20	42	25	22	7.0—8.0	20	26
2.5	8.0—9.0	22	48	30	26	7.5—8.5	22	28
3.0	9.0—10.0	26	56	35	30	8.0—9.0	26	33
4.0	12.0—14.0	30	69	45	39	10.0—12.0	30	38
5.0	14.0—16.0	36	83	55	47	12.0—14.0	36	46
6.0	16.0—18.0	42	98	65	56	—	—	—
7.0	18.0—20.0	48	112	75	64	—	—	—

Примечания: 1. Шаг точек выбран из условия, когда его уменьшение требует изменения режима сварки.

2. Размеры нахлестки приняты из условий плоского участка без учета радиуса закругления отбортовок, профилей и т. п.

3. При сварке лент или соединений из трех деталей, нахлестку необходимо увеличить на 25—30%.

4. При соотношении толщин свариваемых деталей 2 : 1 шаг точек увеличивается на 10—20%, при 3 : 1 — на 30—35%.

Для предохранения от коррозии узлов под нахлестку перед точечной сваркой вводят грунт АЛГ-1 или АЛГ-12 либо клей после сварки. Кроме того, клей повышает статическую и циклическую прочность сварных соединений. Роликовую сварку легких сплавов по слою грунта или клея не производят из-за опасности прожогов.

Выбор оборудования

Для точечной и роликовой сварки легких сплавов применяют машины, обеспечивающие получение кратковременных импульсов тока большой величины. Привод усилия сжатия электродов должен быть малоинерционным, легкоподвижным и обеспечивать переменный график усилия с предварительным обжатием и ковочным усилием. Роликовые машины обычно имеют приводы прерывистого вращения роликов. В связи с тем, что при сварке легких сплавов из сети потребляется большая электрическая мощность, питание машин в большинстве случаев производится от трехфазной сети. Конденсаторные машины отличаются особой стабильностью получаемых соединений и потребляют от сети незначительную электрическую мощность.

Выбор оборудования производится путем сопоставления значений параметров режима и характеристик машин (табл. 2). Необходимо, чтобы параметры оборудования перекрывали на $\pm$ (10 ÷ 20)% параметры режима сварки. При использовании машин МТИ последние должны быть укомплектованы прерывателями ПИТ. Для уменьшения выплесков и повышения стойкости электродов

2. Оборудование для точечной и роликовой сварки легких сплавов

Тип машины	Толщина свариваемых деталей в *мм*	Рабочее пространство в *мм*		Номинальный сварочный ток в *ка*	Максимальное усилие в *кГ*		Мощность, потребляемая из сети, в *ква*/число фаз
		Вылет	Раствор		сварочное	ковочное	
Точечные машины							
МТПУ-300 (П)	0.5–1,5	500	260—400	32	650	1 500	300/1
МТР-1 (К)	0.3–1,5	1200	300–500	40	1000	—	40/3
МТК-6301 (К)	0.3–2,0	1200	200–400	63	1000	2 000	40/3
МТК-75 (К)	0.3–2,5	1500	500	80	1600	3 500	75/3
МТПТ-400 (П)	0.3–2,5	1500	500	73	1600	3 500	400/3
МТПТ-600 (П)	0.5–4,0	1500	650	102	2600	6 500	600/3
МТПП-1000 (Н)	3.0–7,0	1500	650	160	9000	16 000	1000/3
Роликовые машины							
МШПР-300 (П)	0.5–1,2	800–1200	130	33	2000	—	300/1
МШВ-6301 (В)	0.5–3,0	1200	300	63	1000	2 200	500/3
МШШП-400 (П)	0.3–2,5	1200	250	80	900	—	400/3
МШШТ-600 (П)	1,2–3,0	1500	350	100	2200	5 000	600/3
МШШТ-1000 (П)	2.0–5,0	1500	350	150	3200	7 000	1000/3

Условные обозначения машин: (П) — переменного тока; (К) конденсаторная; (Н) низкочастотная; (В) — постоянного тока с выпрямлением во вторичном контуре.

рекомендуется применять прерыватели с модуляторами тока, например, шкафы ШУ-123-3.

Для точечной сварки деталей толщиной менее 1,0 *мм* на машинах с большим весом подвижных частей привода усилия (МТПТ, МТК и др.) применяют специальные головки, например ГТ-3М, которые устанавливают вместо электрододержателя. Головки обеспечивают получение сварочного усилия 50—500 *кГ* и ковочного — до 1000 *кГ* и позволяют сваривать детали толщиной от 0,3 + 0,3 *мм*.

Для изготовления электродов и роликов применяют сплавы: кадмиевую медь Бр. Кд1 (ТУ48-08-272-70), сплав Мц5Б (ТУ1025-63) и хромовую бронзу Бр.Х (прутки ЦМТУ08-209-69, плиты ЦМТУ-106-68) с твердостью не менее 110 *кГ/мм*^{2}. При сварке на жестких режимах использовать бронзу Бр.Х не рекомендуется. Для сварки деталей малой толщины (0,3—0,6 *мм*) электроды могут быть изготовлены из холоднодеформированной меди М1. Рабочая поверхность электродов и роликов обрабатывается по радиусу (табл. 3). Электроды должны иметь интенсивное внутреннее охлаждение. Роликовую сварку алюминиевых сплавов выполняют с наружным охлаждением роликов.

3. Рекомендуемые размеры электродов и роликов

Наименование размеров	Размеры электродов и роликов при толщине детали в *мм*											
	0.3	0.5	0.8	1,0	1,5	2,0	2.5	3,0	4,0	5.0	6.0	7.0
Радиус сферы электрода	25	50	75	75	100	100	150	150	150	200	250	300
Диаметр электрода [1] . .	12	16	16	16	20	25	25	5	32	32	40	40
Радиус рабочей поверхности ролика	25	50	50	75	75	100	100	150	150	250	—	—
Ширина ролика [1]	12	16	16	16	20	20	25	25	32	40	—	—

[1] Минимально допустимые размеры.

При сварке магниевых сплавов применение наружного охлаждения не допускается.

В зависимости от толщины и марки материалов, формы свариваемого узла, а также требований, предъявляемых к их поверхности, применяют различные сочетания электродов и роликов.

Плоские детали равной толщины сваривают электродами и роликами с одинаковыми рабочими поверхностями; в этом случае рекомендуется использовать ролики равных диаметров.

При различной толщине деталей размеры электродов (роликов) устанавливают по табл. 3, соответственно толщине каждой из деталей. В случае соотношения толщин более 3 : 1 со стороны тонкой детали рекомендуется устанавливать электрод с меньшим (на 25—30%) размером рабочей поверхности, чем указано в табл. 3.

При сварке деталей из разноименных сплавов электроды и ролики со стороны материала, обладающего большей теплоэлектропроводностью, должны иметь меньший радиус заточки рабочей поверхности (меньший диаметр).

При роликовой сварке кольцевых швов (обечайки), если рабочие поверхности роликов имеют одинаковые радиусы заточки, внутренний ролик должен быть меньшего диаметра, при одинаковых диаметрах роликов внутренний ролик должен иметь рабочую поверхность меньшего радиуса.

Чистота обработки рабочей поверхности и посадочных мест электродов и роликов должна быть не ниже 7-го класса (ГОСТ 2789—59). Электроды и ролики устанавливают без смещения, перекосов; они должны обеспечивать надежный электрический контакт. Постановка прокладок в посадочных местах не допускается. Рабочую поверхность зачищают абразивной шкуркой № 10—12, обернутой вокруг резиновой пластины толщиной 15—20 *мм*. Зачистка напильником не рекомендуется. После зачистки электроды протирают чистой тканью, а ролики промывают водой. Форму заточки электродов и роликов периодически проверяют шаблонами. При увеличении радиуса заточки более 20% или повреждении рабочей поверхности электроды заменяют. Электроды и ролики следует хранить в специальной деревянной таре, исключающей возможность повреждения рабочей и контактной поверхностей.

Технология сварки

Подготовка поверхности. Общей задачей подготовки поверхности легких сплавов под сварку является создание минимального электрического сопротивления контактов электрод — деталь и достаточно низкого сопротивления контакта деталь — деталь, величины которых должны быть стабильными в течение сварки всего узла.

Удаление краски и других случайных загрязнений не вызывает затруднений. Более сложно удаление окислов. Способ удаления окисных пленок с поверхности деталей устанавливают в зависимости от марки свариваемого материала, размеров деталей и объема производства. Подготовка поверхности алюминиевых сплавов производится травлением или механической зачисткой.

В условиях серийного производства при достаточном объеме сварки, а также для мелких деталей применяют травление. Когда объем сварки незначителен, а также если детали имеют шероховатую поверхность, например прессованные профили, более рациональна механическая зачистка. Подготовка поверхности деталей из алюминиевых сплавов травлением включает следующие операции:

1. Очистка органическими растворителями (смывка, бензин и т. п.).
2. Травление в водном растворе едкого натра (NaOH) 40—60 *г/л* при температуре 40—60° С в течение 1—2,5 *мин*.
3. Промывка в теплой проточной воде (25—35° С).
4. Промывка в холодной проточной воде.
5. Осветление в 20—25%-ном растворе азотной кислоты без подогрева. Время выдержки для плакированных деталей 2—10 *мин*, для неплакированных 15—30 *мин*.
6. Промывка в холодной проточной воде.

7. Травление с пассивированием в водном растворе:
кислота ортофосфорная 70% H_3PO_4 — 50—100 *г/л*;
хромпик калиевый $K_2Cr_2O_7$ — 0,5—1,0 *г/л* или натриевый $Na_2Cr_2O_7$.
Температура раствора 20—40° С, длительность травления соответственно 35—10 *мин*.
8. Промывка в холодной проточной воде.
9. Сушка теплым воздухом (25—50° С).

Подготовка поверхности деталей из магниевых сплавов травлением производится в следующей последовательности:
1. Очистка органическими растворителями.
2. Травление в водном растворе состава:
едкий натр NaOH 300—600 *г/л*;
азотнокислый натр $NaNO_3$ 40—70 *г/л*;
азотнокислый натр $NaNO_2$ 150—250 *г/л*.
Температура раствора 70—100° С, время травления 10—90 *сек*.
3. Промывка в теплой проточной воде (30—50° С).
4. Промывка в холодной проточной воде.
5. Травление с пассивированием в водном растворе хромового ангидрида CrO_3 — 150—250 *г/л*, при 20—25° С, в течение 7—15 *мин*.
6. Промывка в теплой проточной воде (30—50° С).
7. Промывка в холодной проточной воде.
8. Сушка теплым воздухом (25—50° С).

Ванны для травления в растворе щелочи изготовляют из малоуглеродистой стали, а для травления с пассивированием — из нержавеющей стали или диабаза. Подвески для крупных деталей и корзины для мелких выполняют из нержавеющей стали. Электрического контакта между деталями и металлической ванной не должно быть

При сварке деталей из сплава АМг6 толщиной более 2 *мм* часто образуются непровары, связанные с неполным расплавлением алюминиевой плакировки в контакте деталь — деталь. Для получения стабильного качества сварных соединений деталей из сплава АМг6 рекомендуется перед предварительной сборкой деталей удалять плакирующий слой методом химического фрезерования в 10%-ном растворе едкого натра. Целесообразно плакирующий слой удалять только с внутренних сторон нахлестки; наружные поверхности деталей защищать способами, принятыми при химическом фрезеровании алюминиевых сплавов. Контроль полноты удаления плакирующего слоя производится визуально методом сравнения с эталонными образцами.

Механическую зачистку производят обычно круглой проволочной щеткой или абразивной шкуркой мелкой зернистости. Диаметр щетки обычно бывает 120—150 *мм*, диаметр стальной нагартованной проволоки не более 0,3 *мм*. Свободная незакрепленная часть проволоки должна быть длиной 40—50 *мм*; число оборотов щетки 1000—2500 в минуту. После механической зачистки детали обдувают сухим сжатым воздухом. Качество подготовки поверхности проверяют измерением переходного электрического сопротивления двух сжатых между собой деталей или пластинок — образцов-свидетелей, которые обрабатывают аналогично свариваемым деталям. При правильном режиме подготовки поверхности контактное сопротивление деталей должно быть 120—150 *мком* (нормально 30—60 *мком*). Разброс величины контактного сопротивления не должен превышать +25%. После травления это сопротивление сохраняется в течение 5 суток. После механической зачистки контактное сопротивление быстро нарастает, в связи с этим детали должны быть сварены в течение 4—6 *ч*.

Для контроля качества поверхности детали или образцы зажимаются между электродами специального пресса или между электродами точечной машины. В последнем случае один из электродов изолируется от вторичного контура.

Контактное сопротивление измеряют микроомметром типа М246 или другим прибором, предназначенным для измерения малых сопротивлений. Необходимо отметить, что качество подготовки поверхности существенно влияет на

количество сварных точек, выполненных без зачистки электродов. Так, при травлении число таких точек составляет не менее 100 (достигает 500 точек); при механической зачистке обычно не более 15 точек.

В случае, если контактное сопротивление превышает 150 *мком*, производится повторная подготовка поверхности, которая допускается для деталей толщиной 0,8 *мм* не более одного раза; для деталей свыше 0,8 *мм* — не более 2 раз. После травления и, особенно, после повторного для алюминиевых сплавов с пониженной коррозионной стойкостью (Д16, В95 и др.) рекомендуется контролировать толщину плакирующего слоя, которая должна быть не менее 50% исходной.

Сборка и прихватка деталей. При сборке и прихватке деталей последовательность операций следующая: предварительная сборка и разборка узла, подготовка поверхности, окончательная сборка, прихватка. Если детали взаимозаменяемы, то предварительная сборка не обязательна. Нанесение грунта, клея (если предусмотрено технологией) производится перед окончательной сборкой. Перед окончательной сборкой необходимо проверить чистоту поверхности деталей в местах сварки; обнаруженные загрязнения должны быть удалены. В процессе сборки нельзя допускать попадания загрязнений под нахлестку. Сборка деталей в зависимости от сложности изделия может производиться с использованием съемных болтов, фиксаторов, струбцин и других приспособлений. Сборочные приспособления, находящиеся при сварке в контуре сварочной машины, изготовляют из немагнитных материалов. При сборке деталей не допускается грубая подгонка деталей с образованием хлопунов и больших зазоров. Предварительно собранные узлы разбирают и комплектно подготавливают поверхности деталей (совместно с контрольными образцами).

При окончательной сборке графитовым карандашом отмечают места прихватки и сварки. При точечной сварке прихваточные точки должны совпадать с основными. При роликовой сварке прихваточные точки должны располагаться по осевой линии шва. Прихватку деталей, свариваемых точечной сваркой, производят на режимах, установленных для сварки данных деталей. Прихватка деталей, свариваемых роликовым швом, может выполняться как на точечной, так и на роликовой машинах, на режимах точечной сварки для данных материалов. Вмятины от прихваточных точек не должны превышать 10% толщины детали. Длина прихватки на роликовой машине должна быть не более двойной ширины литой зоны. В зависимости от конструкции сварного узла точки прихватки устанавливаются с шагом 100—200 *мм*, величина зазоров должна быть в пределах 0,1—0,5 *мм*. При сварке плоских панелей постановка прихваточных точек производится от середины к краям деталей. При сварке обечаек точки прихватки устанавливают в таком порядке, при котором каждая последующая точка ставится диаметрально противоположно предыдущей. Прихватка должна обеспечить жесткое закрепление деталей сварного узла и сохранение его размеров. После постановки прихваточных точек сварные узлы подвергают контролю: проверяют размеры узла; качество прихваточных точек и величину зазора между деталями. В случае необходимости узлы подвергаются правке.

Режимы сварки. Режим сварки устанавливают на образцах технологической пробы, которые по толщине, марке материала, подготовке поверхности, а иногда и по форме аналогичны свариваемым деталям. Правильность выбранного режима проверяют путем проведения комплекса различных испытаний образцов (см. ниже). Наибольшее влияние на режим сварки оказывают такие свойства материалов, как теплоэлектропроводность и предел текучести при повышенных температурах. Исходя из этого, с точки зрения режимов сварки легкие сплавы можно разделить на три группы:

I — Д16АТ, Д20АТ, В95АТ, АМг6 и др.;
II — АМг3, АМг, АМц и др.;
III — МА-1, МА-2, МА-8 и др.

В табл. 4—10 приведены для каждой группы сплавов параметры режима сварки, которые обеспечивают получение сварных соединений без дефектов с размерами, приведенными в табл. 1.

4. Ориентировочные режимы точечной сварки на низкочастотных машинах (сплавы I группы)

Толщина деталей в мм	Радиус сферы электродов в мм	Усилие сжатия электродов в кГ			Включение ковочного усилия $t_к$ в сек	Сварочный ток			
						основной		дополнительный	
		сварочное начальное $F_{св.н}$	сварочное конечное[1] $F_{св.к}$	ковочное $F_к$		$I_{св.м}$ в ка	$t_{св}$ в сек	$I_{доп.м}$ в ка	$t_{доп}$ в сек
0,3 + 0,3	25	120	—	—	-	20	0,02	—	—
0,5 + 0,5	25	200	—	500	0,04	26	0,04	-	--
0,5 + 0,5	25	200	—	400	0,06	26	0,04	17	0,04
0,8 + 0,8	50	300	—	650	0,06	32	0,04	--	—
0,8 + 0,8	50	300	—	500	0,06	32	0,04	22	0,04
1,0 + 1,0	75	400	—	900	0,08	40	0,06	—	--
1,0 + 1,0	75	400	--	700	0,1	40	0,06	27	0,06
1,5 + 1,5	100	500	—	1 400	0,10	47	0,08	--	—
1,5 + 1,5	100	500	-	1 100	0,12	47	0,08	32	0,08
2,0 + 2,0	100	700	--	1 900	0,14	56	0,10	—	—
2,0 + 2,0	100	700	-	1 700	0,16	56	0,10	38	0,10
2,5 + 2,5	150	900	-	2 600	0,16	65	0,12	—	--
2,5 + 2,5	150	900	—	2 100	0,20	65	0,12	43	0,12
3,0 + 3,0	150	1200	—	3 200	0,22	70	0,16	--	—
3,0 + 3,0	150	1200	-	2 700	0,24	70	0,16	48	0,16
4,0 + 4,0	150	2800	—	6 000	0,28	85	0,20	--	—
4,0 + 4,0	150	2800	-	5 200	0,30	85	0,20	55	0,20
5,0 + 5,0	200	1600	3650/0,10	9 100	0,38	130	0,26	60	0,26
6,0 + 6,0	250	2250	6000/0,12	11 500	0,44	155	0,30	70	0,32
7,0 + 7,0	250	2750	7000/0,14	15 000	0,52	170	0,36	75	0,40
0,8 + 2,0	50/100	350	—	1 000	0,08	35	0,06	—	—
0,8 + 3,0	50/100	350	—	1 200	0,08	35	0,06	—	—
1,0 + 2,0	75/100	500	-	1 200	0,08	44	0,06	--	-
1,0 + 3,0	75/150	500	—	1 500	0,10	44	0,08	-	-
1,0 + 4,0	75/200	500	-	2 000	0,10	46	0,08	-	-
1,5 + 3,0	100/150	600	—	1 800	0,12	47	0,10	--	--
2,0 + 4,0	100/200	800	—	2 500	0,16	60	0,14	--	—

[1] В знаменателе время увеличения сварочного усилия в *сек*.

5. Ориентировочные режимы точечной сварки на низкочастотных машинах

Толщина деталей в мм	Радиус сферы электродов в мм	Усилие сжатия электродов в кГ		Включение ковочного усилия $t_к$ в сек	Сварочный ток	
		сварочное $F_{св}$	ковочное $F_к$		$t_{св}$ в сек	$I_{св.м}$ в ка
Сплавы II группы						
0,5 + 0,5	25	120	—	—	0,04	25
0,8 + 0,8	25	200	—	—	0,04	28
1,0 + 1,0	50	250	—	—	0,06	34
1,5 + 1,5	75	350	--	—	0,08	38
2,0 + 2,0	75	500	1000	0,14	0,10	50
2,5 + 2,5	100	650	1400	0,18	0,12	57
3,0 + 3,0	100	800	2000	0,20	0,16	62
4,0 + 4,0	100	900	2600	0,28	0,20	72
1,0 + 2,0	50/100	250	-	—	0,06	35
1,0 + 3,0	50/150	250	—	--	0,06	35
1,0 + 4,0	50/200	250	-	—	0,06	35

Продолжение табл. 5

Толщина деталей в *мм*	Радиус сферы электродов в *мм*	Усилие сжатия электродов в *кГ*		Включение ковочного усилия $t_к$ в *сек*	Сварочный ток	
		сварочное $F_{св}$	ковочное $F_к$		$t_{св}$ в *сек*	$I_{св.м}$ в *ка*
Сплавы III группы						
0,8 + 0,8	75	200	400	0,08	0,06	26
1,0 + 1,0	75	250	600	0,1	0,08	28
1,5 + 1,5	100	350	800	0,12	0,1	35
2,0 + 2,0	100	450	1000	0,16	0,14	41
2,5 + 2,5	150	550	1400	0,2	0,16	43
3,0 + 3,0	150	650	2000	0,28	0,20	48
4,0 + 4,0	150	800	2600	0,32	0,24	53

6. Ориентировочные режимы точечной сварки разноименных алюминиевых сплавов на низкочастотных машинах

Марка материала	Толщина деталей в *мм*	Радиус сферы электродов в *мм*	Усилие сжатия электродов в *кГ*		Включение ковочного усилия $t_к$ в *сек*	Сварочный ток			
						основной		дополнительный	
			сварочное $F_{св}$	ковочное $F_к$		$t_{св}$ в *сек*	$I_{св.м}$ в *ка*	$t_{доп}$ в *сек*	$I_{доп.м}$ в *ка*
АМг6 + Д16АТ	1,0 + 1,0	50/75	350	950	0,16	0,1	45	—	—
	1,5 + 1,5	75/100	500	1100	0,16	0,1	50	—	—
	2,0 + 2,0	100/150	900	2250	0,18	0,12	60	—	—
	2,5 + 2,5	100/150	1000	2400	0,18	0,12	64	0,05	32
	3,0 + 3,0	100/150	1100	2900	0,18	0,12	68	0,10	30
Д16АТ + Д16АМ	2,0 + 2,0	150/75	600	1600	0,18	0,12	60	—	—
АМг6 + Д16АТ	1,0 + 2,0	50/100	350	700	0,16	0,1	47	—	—
	1,0 + 3,0	50/пл.	500	1500	0,14	0,08	45	—	—
	2,0 + 1,0	100/50	500	800	0,16	0,10	49	—	—
	2,0 + 4,0	75/150	600	2000	0,18	0,12	57	0,06	30
	4,0 + 2,0	150/75	600	2000	0,18	0,12	64	—	—
Д16АМ + Д16АТ	1,0 + 2,0	150/75	350	1500	0,16	0,1	47	—	—
	3,0 + 1,0	150/75	350	1500	0,18	0,12	52	—	—
	4,0 + 1,0	150/75	350	1500	0,16	0,12	43	0,04	30
Д16АМ + АМг6	3,0 + 1,0	150/75	350	1500	0,14	0,08	45	—	—
	4,0 + 1,0	150/75	350	1500	0,14	0,08	47	—	—
ВАД1Т + Д16АТ	4,0 + 2,0	150/100	800	2400	0,20	0,16	63	—	—
ВАД1Т + АМг6	4,0 + 2,0	150/100	850	2400	0,20	0,16	61	—	—

7. Ориентировочные режимы точечной сварки на конденсаторных машинах

Толщина деталей в *мм*	Радиус сферы электродов в *мм*	Усилие сжатия электродов в *кГ*		Включение ковочного усилия $t_к$ в *сек*	Сварочный ток $I_{св.м}$ в *ка*	Длительность импульса в *сек*		Настройка машины МТК-75	
		сварочное $F_{св}$	ковочное $F_к$			$t_м$	T	Напряжение конденсаторов в *в*	Емкость батарей в *мкф*
Сплавы I группы									
0,3 + 0,3	25	120	—	—	16	0,006	0,021	360	8 400
0,5 + 0,5	25	200	—	—	20,5	0,012	0,027	320	16 800
0,8 + 0,8	50	300	500	0,034	27,5	0,014	0,039	360	25 200
1,0 + 1,0	75	400	800	0,041	30,5	0,018	0,046	340	33 600
1,5 + 1,5	100	600	1400	0,065	48,0	0,026	0,068	360	84 000
2,0 + 2,0	100	800	2100	0,084	55,0	0,028	0,074	380	109 200
2,5 + 2,5	150	1000	3000	0,127	67,0	0,038	0,104	400	176 400
0,5 + 2,0	25/пл.	200	—	—	25,5	0,012	0,027	370	16 800
1,0 + 2,0	75/100	400	800	0,041	30,5	0,018	0,046	340	33 600
1,0 + 4,0	75/100	400	800	0,049	32,5	0,019	0,050	340	42 000
1,5 + 4,0	100/пл.	600	1400	0,074	50,0	0,026	0,080	360	92 400
Сплавы II группы									
0,3 + 0,3	25	80	—	—	15,0	0,006	0,021	340	8 400
0,5 + 0,5	25	120	—	—	20,5	0,012	0,027	320	16 800
0,8 + 0,8	50	190	—	—	28,0	0,018	0,046	320	33 600
1,0 + 1,0	50	250	—	—	32,5	0,019	0,050	340	42 000
1,5 + 1,5	75	400	—	—	44,0	0,024	0,064	360	67 200
2,0 + 2,0	75	550	1000	0,084	54,0	0,036	0,078	380	100 800
2,5 + 2,5	100	700	1400	0,118	65,0	0,032	0,100	400	168 000
0,8 + 3,0	50/100	190	—	—	33,0	0,020	0,056	320	51 400
1,0 + 3,0	50/100	250	—	—	40,0	0,024	0,064	340	67 200
1,5 + 3,0	75/100	400	—	—	48,0	0,026	0,066	360	8 400

Коэффициент трансформации равен 39.

8. Ориентировочный режим точечной сварки разноименных алюминиевых сплавов на конденсаторных машинах

Марка материала	Толщина деталей в *мм*	Радиус сферы электродов в *мм*	Усилие сжатия электродов в *кГ*		Включение ковочного усилия $t_к$ в *сек*	Сварочный ток $I_{св.м}$ в *ка*	Длительность импульса в *сек*		Настройка машины МТК-75	
			сварочное $F_{св}$	ковочное $F_к$			$t_м$	T	Напряжение конденсаторов в *в*	Емкость батарей в *мкф*
АМцАМ + Д16АТ	1,0 + 1,0	50/пл.	400	—	—	35,0	0,02	0,056	330	51 400
	1,5 + 1,5	75/пл.	400	800	0,065	48,0	0,026	0,068	360	84 000
	2,0 + 2,0	75/пл.	550	1000	0,084	55,0	0,028	0,074	380	109 200
	2,5 + 2,5	100/пл.	700	1400	0,127	67,0	0,033	0,104	400	176 400
	3,0 + 1,0	100/75	400	—	—	38,0	0,020	0,056	350	51 400
	3,0 + 1,5	100	600	1000	0,065	51,0	0,026	0,070	380	84 000
	2,0 + 1,0	75	400	—	—	36,0	0,020	0,056	340	51 400
	1,0 + 3,0	50/пл.	350	700	0,054	39,0	0,022	0,070	360	58 800
	1,5 + 3,0	75/пл.	500	800	0,065	35,0	0,026	0,068	380	84 000
	1,0 + 2,0	50/пл.	350	600	0,041	35,0	0,018	0,046	400	33 600
АМцАМ + В95АТ	1,0 + 2,0	50/пл.	350	600	0,049	53,5	0,019	0,050	380	42 000
В95Т + Д16АТ	2,0 + 2,0	100	800	2100	0,084	58,5	0,028	0,074	370	109 200
В95Т + АМг6	2,0 + 2,0	100	900	2100	0,084	53,5	0,028	0,074	370	109 200
Д16АТ + АМг6	2,0 + 2,0	100	900	2100	0,084	53,5	0,028	0,074	370	109 200

Коэффициент трансформации равен 39.

9. Ориентировочные режимы точечной сварки на машинах переменного тока

Толщина деталей в *мм*	Радиус сферы электродов в *мм*	Усилие сжатия электродов в *кГ*		Включение ковочного усилия $t_к$ в *сек*	Параметры тока			
		сварочное $F_{св}$	ковочное $F_к$		$I_{св.д}$ в *ка*	$t_н$ в *сек*	$t_{св}$ в *сек*	$t_{сп}$ в *сек*
Сплавы I группы								
0,5 + 0,5	25	220	—	—	17	—	0,08	—
	25	200	—	—	16	0,04	0,08	0,12
0,8 + 0,8	50	350	—	—	19	—	0,10	—
	50	300	—	—	18	0,04	0,10	0,14
1,0 + 1,0	75	450	—	—	24	—	0,12	—
	75	350	—	—	23	0,04	0,12	0,14
1,5 + 1,5	100	650	—	—	30	—	0,16	—
	100	550	—	—	29	0,06	0,16	0,16
	100	450	1000	0,24	27	0,06	0,16	0,16
	100	450	1200	0,18	28	—	0,16	—
2,0 + 2,0	100	800	—	—	35	—	0,20	—
	100	700	—	—	33	0,08	0,20	0,18
	100	650	1200	0,32	31	0,08	0,20	0,18
	100	650	1500	0,24	32	—	0,20	—
Сплавы II группы								
0,5 + 0,5	25	130	—	—	18	—	0,04	—
0,8 + 0,8	50	190	—	—	22	—	0,06	—
1,0 + 1,0	75	250	—	—	26	—	0,08	—
1,5 + 1,5	100	350	—	—	32	—	0,10	—
2,0 + 2,0	100	500	—	—	34	—	0,12	—
2,0 + 2,0	100	400	1000	0,16	32	—	0,14	—
Сплавы III группы								
0,8 + 0,8	50	300	—	—	20	—	0,1	—
1,0 + 1,0	75	400	—	—	24	—	0,12	—
1,5 + 1,5	100	500	—	—	27	—	0,14	—
2,0 + 2,0	100	700	—	—	30	—	0,18	—

10. Ориентировочные режимы роликовой сварки на низкочастотных машинах

Толщина деталей в *мм*	Радиус рабочей поверхности роликов в *мм*	Сварочное усилие сжатия роликов в *кГ*	Сварочный ток		Шаг в *мм*	Скорость сварки точек/*мин*	Сварочное оборудование
		$F_{св}$	$t_{св}$ в *сек*	$I_{св.м}$ в *ка*			
Сплавы I группы							
1,0 + 1,0	75	550	0,1	47	1,5	150	МШПШ-400
1,5 + 1,5	75	800	0,12	55	2,5	120	
2,0 + 2,0	100	900	0,14	61	3,8	100	
2,5 + 2,5	100	1000	0,16	68	4,2	80	
1,0 + 2,0	75/150	550	0,08	47	1,5	120	
1,0 + 2,5	75/150	550	0,10	49	1,5	120	
1,5 + 2,5	75/150	800	0,12	50	2,5	110	
2,0 + 2,5	100/150	900	0,12	55	3,8	100	
1,0 + 1,0	100	800	0,1	58	2,0	150	МШПТ-600
1,5 + 1,5	100	1000	0,12	63	3,0	140	
2,0 + 2,0	100	1500	0,14	70	4,0	120	
2,5 + 2,5	150	2000	0,16	88	4,2	120	
3,0 + 3,0	150	2700	0,18	95	5,0	100	

Продолжение табл. 10

Толщина деталей в *мм*	Радиус рабочей поверхности роликов в *мм*	Сварочное усилие сжатия роликов в *кГ*	Сварочный ток		Шаг в *мм*	Скорость сварки точек/*мин*	Сварочное оборудование
		$F_{св}$	$I_{св}$ в *сек*	$I_{св.м}$ в *ка*			
2,0 + 2,0	100	1500	0,14	82	4,0	120	МШШТ-1000
2,5 + 2,5	150	2000	0,16	88	4,2	120	
3,0 + 3,0	150	2700/4700 *	0,18	97	5,0	120	
4,0 + 4,0	200	3500/5900 *	0,20	100	7,0	60	
5,0 + 5,0	250	4000/7000 *	0,24	110	10,0	50	
Сплавы II группы							
1,0 + 1,0	75	300	0,1	47	1,5	150	МШШИ-400
1,5 + 1,5	75	450	0,12	49	2,5	120	
2,0 + 2,0	100	550	0,14	55	3,8	100	
2,5 + 2,5	100	650	0,16	62	4,2	80	
1,0 + 1,0	100	600	0,1	58	2,0	150	МШШТ-600
1,5 + 1,5	100	670	0,12	62	3,0	140	
2,0 + 2,0	100	750	0,14	65	4,0	120	
2,5 + 2,5	150	850	0,16	68	4,2	120	
3,0 + 3,0	150	900	0,18	70	5,0	100	
2,0 + 2,0	100	1000	0,14	80	4,0	120	МШШТ-1000
2,5 + 2,5	150	1200	0,16	85	4,2	120	
3,0 + 3,0	150	1500	0,18	88	5,0	100	
4,0 + 4,0	200	1800	0,20	90	7,0	60	
5,0 + 5,0	250	2500	0,24	100	10,0	50	

* Ковочное усилие включается соответственно на 0,22, 0,26 и 0,32 *сек*.

Для сварки I группы сплавов, обладающих повышенной склонностью к образованию выплесков и трещин, требуются относительно высокие значения усилий сжатия. При роликовой сварке площадь касания ролика с деталью несколько больше, чем при точечной сварке электрода с деталью, кроме того, происходит значительное шунтирование тока через ранее сваренные участки шва. В соответствии с этим по сравнению с точечной сваркой увеличиваются на 5—10% усилия сжатия и на 15—25% сварочный ток. В случае двух швов с перекрытием ток при сварке второго шва повышается на 15—20%.

Приведенные режимы сварки ориентированы на сплавы со средним значением предела текучести и удельного электрического сопротивления. Такими сплавами являются для I группы Д16АТ, для II группы АМцАМ и для III группы МА-8. При сварке других сплавов указанные режимы сварки следует несколько корректировать. Так, например, при сварке В95АТ — сплава I группы с наиболее высоким пределом текучести усилие сжатия должно быть увеличено на 15—20%, а ток на 5—10%. При сварке сплавов АМг6 усилие сжатия несколько повышают, не изменяя сварочного тока. Величину ковочного усилия и момент его приложения устанавливают в зависимости от склонности сплава к трещинообразованию. При сварке сплавов I группы в неупрочненном состоянии (Д16АМ, Д20АМ и т. п.) сварочное и ковочное усилия понижают на 15—20% по сравнению с упрочненными сплавами.

Ковочное усилие может быть снижено, если применять режимы сварки с дополнительным импульсом тока. При сварке сплавов II группы усилия сжатия должны быть снижены, при этом особое внимание следует обратить на стабильность усилий, так как в связи с высокой пластичностью сплавов II группы повышение усилия сжатия резко увеличивает площадь контакта электрод —

деталь, плотность тока снижается и возможно уменьшение размеров литой зоны и даже непровар. В связи с этим сварку сплавов II группы, особенно таких как АМц, рекомендуется производить электродами и роликами с меньшей сферой рабочей поверхности, чем сплавов I группы. Из-за низкой коррозионной стойкости сплавов III группы налипание меди электродов на поверхность свариваемых деталей не должно допускаться.

При сварке узлов вследствие возможного дополнительного шунтирования тока, наличия зазоров и т. п. режимы могут также подвергаться корректировке. Так, при уменьшении шага между точками сверх допустимых размеров, указанных в табл. 1, сварочный ток следует увеличивать. При сварке жестких конструкций с наличием трудно устраняемых зазоров необходимо повышать усилие сжатия электродов.

Приведенные режимы точечной и роликовой сварки являются в основном достаточно жесткими. В некоторых случаях, например, при недостаточной мощности оборудования и применении фигурных электродов могут быть применены более мягкие режимы. При этом удается несколько снизить сварочный ток и усилие сжатия электродов. Однако переход на мягкие режимы вследствие расширения области разогрева металла сопровождается увеличением деформаций, короблений деталей и снижением стойкости электродов.

Для повышения производительности и стойкости электродов точечную сварку можно выполнять на роликовых машинах. В этом случае в основном используют режимы точечной сварки с некоторым (на 5—10%) увеличением сварочного тока и усилия сжатия. При точечной и роликовой сварке на машинах постоянного тока параметры режима те же, что и в случае низкочастотных машин.

При точечной и роликовой сварке деталей неравной толщины следует применять жесткие режимы сварки и соответствующим образом выбирать рабочие поверхности электродов. Особо хорошие результаты дает сварка деталей неравной толщины на конденсаторных машинах (типа МТК и др.).

При сварке деталей из разноименных сплавов, имеющих различный химический состав, физические и механические свойства, возникают трудности, связанные главным образом с различием в электротеплопроводности, температуре плавления, теплостойкости, а также в изменении свойств металла при нагреве. При сравнительно большой разнице в физических свойствах зона расплавления (если не принимать специальных мер) может находиться полностью в одной из свариваемых деталей. Так, например, при точечной сварке деталей из сплавов АМц + Д16АТ вследствие повышенной электротеплопроводности сплава АМц зона расплавления целиком будет расположена в детали из сплава Д16АТ. Величину тока и усилие сжатия электродов выбирают, ориентируясь на режим сварки сплава, обладающего лучшей электротеплопроводностью и более высокой температурой плавления, и несколько корректируют.

Особые трудности возникают при сварке деталей из разноименных сплавов различной толщины. Смещение литой зоны в толстую деталь увеличивается, если тонкая деталь имеет более высокую электротеплопроводность и температуру плавления. Для обеспечения взаимного расплавления деталей в этом случае применяют те же приемы, которые были ранее рассмотрены при сварке деталей разной толщины.

При точечной сварке по сырому грунту или клею для лучшего выдавливания последних из зоны сварки рекомендуется применять предварительное обжатие электродов.

В результате сварки может наблюдаться искажение размеров узла — коробление. Основными причинами коробления являются: зазоры в местах сварки, усадка металла в сварном шве, сдвиг деталей относительно друг друга при формировании шва, неправильное положение узла при сварке, отсутствие предварительного закрепления (прихватки) деталей, неправильный порядок сварки.

Зазоры являются результатом неточности изготовления деталей, а также дефектом предварительной сборки. Наличие их при сварке вызывает образова-

ние вмятин и выплесков. Местное коробление может быть уменьшено путем равномерного распределения излишнего металла по периметру шва. Равномерное распределение зазора особенно существенно при роликовой сварке; для этого рекомендуется уменьшить шаг между прихватками. Деформация металла от усадки вдоль шва, а также вспучивание деталей при точечной сварке от кольцевого зазора вызывают сокращение общей длины по линии шва. Так как при этом соседние участки деталей сохраняют исходные размеры, образуются как бы излишки металла, в связи с чем возникает коробление. Усилие электродов стремится вызвать деформацию местного растяжения в зоне сварки. Для уменьшения коробления от усадки подбирают режимы сварки, при которых удается скомпенсировать напряжения сжатия (от усадки) и растяжения (от усилия электродов). Это выполняется путем соответствующего выбора величины ковочного усилия и момента его приложения.

Коробление при сварке возникает также при смещении электродов относительно друг друга под действием усилия сжатия электродов. Для снижения коробления следует добиваться отсутствия взаимного перемещения электродов повышением общей жесткости или путем создания одинаковой жесткости нижней и верхней консолей машины.

Если узел в процессе прихватки или сварки провисает, то вследствие различной жесткости деталей между ними может образоваться зазор. Последний в случае неправильного порядка прихватки или сварки может вызвать в дальнейшем коробление. В таких случаях для снижения коробления необходимо применять различного рода поддерживающие приспособления, а при их отсутствии прихватку, которую нужно вести от середины к краям, не допуская образования местных зазоров.

Благодаря применению относительно жестких режимов и активного охлаждения при роликовой и особенно точечной сварке общее коробление обычно по сравнению с другими видами сварки невелико. Для устранения коробления узлы после сварки подвергают правке. Правка связана с пластической деформацией узлов и производится ударом, прессованием, местным подогревом.

Контроль качества сварных соединений

Для обеспечения требуемого качества сварных соединений легких сплавов применяют следующие способы контроля: внешний осмотр, технологическую пробу; исследование макроструктуры сварных соединений на контрольных образцах; рентгеновское просвечивание контрольных образцов и узлов, механические испытания контрольных образцов; измерение параметров режима сварки; испытание на герметичность (в случае необходимости).

Внешний осмотр производят с помощью лупы с 4—10-кратным увеличением. При этом проверяют: расположение сварных точек или швов в соответствии с чертежом; форму и размеры вмятины от электродов (роликов); наличие наружных дефектов; зазоры между деталями после сварки. Отпечатки точек должны иметь форму окружности (допускается овальность не более 3 : 2). Отпечатки роликового шва должны иметь равномерную чешуйчатость. Размеры отпечатков от электродов (роликов) не являются критерием оценки качества сварного соединения. Однако изменение размеров отпечатков при постановке ряда точек или участка шва с неизменной настройкой машины свидетельствует о нарушении условий сварки и возможном ухудшении качества. В этом случае сварку следует прекратить и произвести контроль технологической пробой и исследованием макроструктуры. Зазоры между деталями после сварки (раскрытие нахлестки) должны быть не более 20% толщины листа для деталей толщиной до 2,0 *мм* включительно и 15% — для деталей толщиной свыше 2,0 *мм*.

Технологической пробой проверяют размер вырыва ядра точки, ширину роликового шва и характер разрушения сварного соединения. Образцы для технологической пробы должны быть идентичны деталям по марке и состоянию поставки материала по форме и толщине, по подготовке поверхности. Шаг

точек должен быть аналогичен шагу точек узла. Ширину образцов устанавливают на 20—30% больше нахлестки свариваемых деталей. Длина образцов при точечной сварке должна обеспечивать постановку не менее пяти точек, при роликовой сварке — выполнение шва не менее 100 *мм*. При сварке кольцевых швов образцы рекомендуется изготовлять в виде замкнутого кольца, равного диаметру свариваемых деталей. Для определения качества режима сварки образцы технологической пробы подвергают разрушению в тисках или других приспособлениях. При этом разрушение должно происходить по зоне термического влияния или по основному материалу. В случае несквозного разрушения глубина вырыва должна составлять не менее 30% толщины листа.

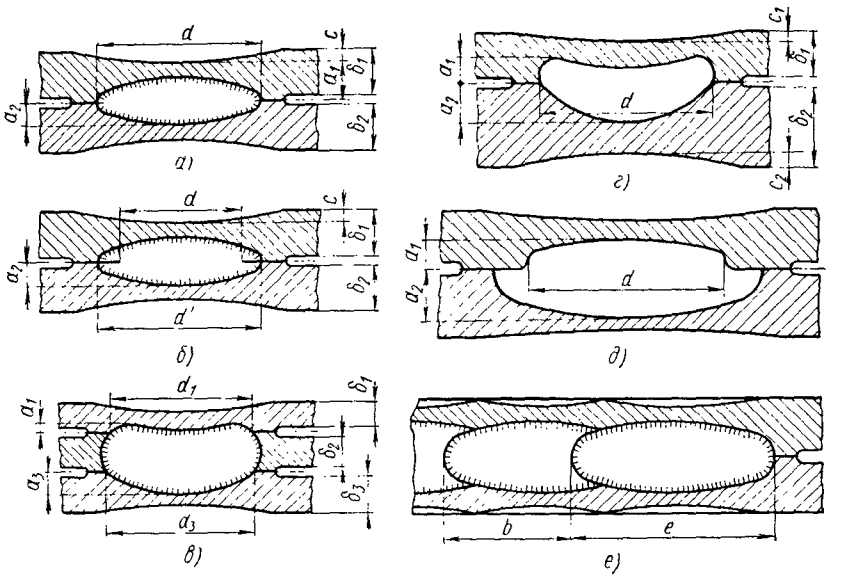


Рис. 1. Схема определения размеров литой зоны на макрошлифах соединений: *а* — нормальная литая зона; *б* — в случае плакировки на периферии литой зоны; *в* — соединение из трех деталей; *г* — соединение деталей неравной толщины; *д* — соединение деталей из разноименных сплавов; *е* — роликовый шов (продольный шлиф)

Исследование макроструктуры на контрольных образцах производится для определения размеров литой зоны сварного соединения, величин вмятин от электродов (роликов), а также для выявления дефектов в литой зоне и зоне термического влияния. Шлифы для исследования макроструктуры получают путем разрезания сварных образцов по центру ядра или литой зоны шва перпендикулярно плоскости соединения. При роликовой сварке шлифы изготовляют в продольном и поперечном направлении. На макрошлифе должны быть хорошо видны граница между металлом ядра и основным металлом, а на продольном шлифе роликового шва — перекрытие точек.

Расчетный размер ядра или ширину роликового шва определяют на макрошлифах по линии соединения деталей (рис. 1). Они должны быть не меньше размеров, указанных в табл. 1. На плакированных сплавах расчетный размер не должен быть меньше 0,75 размера литой зоны (рис. 1, *б*). При сварке деталей неравной толщины диаметр ядра или ширину литой зоны определяют для тонкой детали соединения. В случае сварки трех деталей диаметр или ширину литой зоны роликового шва находят раздельно для каждой пары сопрягаемых дета-

лей (рис. 1, *в*). Они должны быть не меньше размеров, указанных в табл. 1 для соответствующей толщины тонкой детали.

Величину проплавления определяют на шлифах, как отношение расстояния от линии соединения деталей до границы литой зоны к толщине детали (рис. 1):

$$A_1 = \frac{a_1}{\delta_1} 100\%;$$

$$A_2 = \frac{a_2}{\delta_2} 100\%.$$

Для алюминиевых сплавов она не должна выходить за пределы 20—80%, для магниевых — 20—60%. Чтобы обеспечить стабильность качества сварных соединений, рекомендуется производить сварку на режимах, обеспечивающих проплавление 40—60%. Кроме того, во всех случаях должно соблюдаться соотношение $\frac{a + c}{\delta} \leqslant 80\%$, где c — глубина вмятины. При сварке деталей неравной толщины величина проплавления в каждой из деталей должна быть не менее 20% толщины тонкой детали.

Величина перекрытия литых зон роликового шва $B = 1 - \frac{b}{e} 100\%$ (см. рис. 1, *е*), где b — величина неперекрытой части литой зоны (определяется на продольном шлифе образца в любом месте шва); e — размер литой зоны последней точки шва. Для герметичного шва B должно быть в пределах 25—50%.

Глубина вмятин от электродов (роликов) на поверхности деталей характеризуется отношением $\frac{c}{\delta} 100\%$, т. е. отношением глубины отпечатка к толщине детали, и измеряется отдельно для каждой из деталей ($\frac{c_1}{\delta_1} 100\%$; $\frac{c_2}{\delta_2} 100\%$, рис. 1, *г*) с помощью индикатора часового типа (цена деления 0,01 *мм*) или на шлифах с помощью микроскопа. При сварке деталей с отношением толщины не более 2 : 1 глубина вмятины не должна превышать 15%, а для деталей с отношением толщин более 2 : 1 — 20%.

Внутренние дефекты (поры, трещины, раковины) обнаруживают без разрушения соединения рентгеновским просвечиванием. Поры, трещины, раковины допускаются, если они расположены в центре литой зоны и не выходят за пределы $^1/_3$ диаметра ядра точки или $^1/_3$ ширины литой зоны роликового шва. Дефекты по высоте не должны выходить за пределы литой зоны. Наиболее опасным и трудно выявляемым дефектом является отсутствие проплавления в виде так называемой склейки соединяемых деталей. Такие соединения могут выдерживать значительные статические нагрузки на срез, однако разрушаются при отрывающих и динамических нагрузках.

Вследствие особенности некоторых сплавов (Д16, В95, МА-2 и др.), литая зона которых имеет резко выраженную неоднородность по химическому составу, удается с помощью рентгеновского просвечивания определять размеры литой зоны сварных соединений. На рис. 2 представлена макроструктура и рентгенограмма сварной точки сплава Д16АТ. Сварная точка выявляется на рентгенограмме в виде концентрически расположенных зон различной контрастности. Наружная серая корона d_1 возникает вследствие утолщения металла за счет образования пластического пояска вокруг литого ядра. Светлое кольцо d_2, темнеющее по направлению к центру точки, выявляет зону термического влияния металла, затронутого нагревом. В этой зоне имеются неоднородности в виде так называемых «усов», которые представляют собой эвтектические образования, обогащенные медью. На периферии зоны термического влияния концентрация меди наиболее значительна, о чем свидетельствует светлое кольцо. Эвтектика $CuAl_2$ выявляется в виде прослоек «усов» по границам зерен. «Усы» при металлогра-

фических исследованиях часто принимают за трещины ввиду повышенной травимости этих зон реактивами. «Усы» не снижают прочности соединения и их не следует считать дефектом, если они не выходят на поверхность листов и не достигают планирующего слоя. Темное кольцо d (рис. 2) образуется за счет наружной зоны литого ядра точки, обогащенной алюминием. Эти участки поглощают рентгеновские лучи меньше, чем основной металл и поэтому выявляются в виде темного кольца. Рентгеновское просвечивание позволяет определять наличие ядра точек на плакированном сплаве Д16 толщиной 0,5 + +0,5 *мм* и выше.

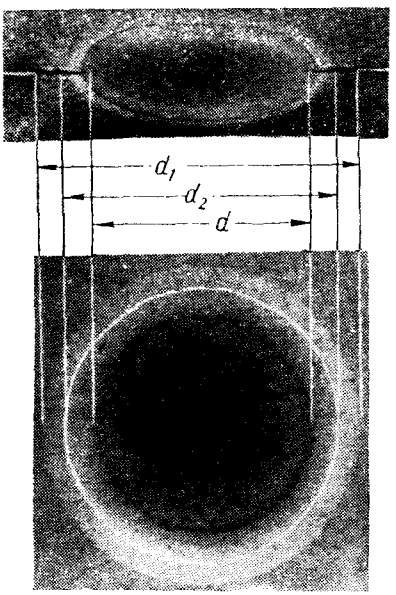


Рис. 2. Макроструктура сварной точки сплава Д16АТ и рентгенограмма

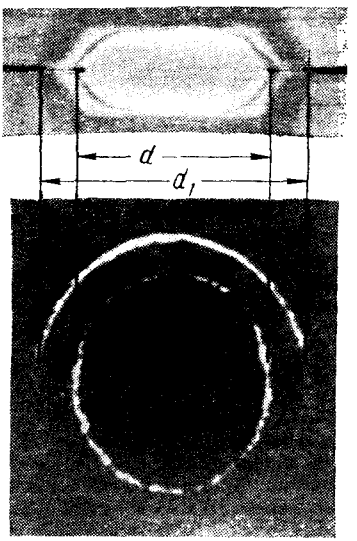


Рис. 3. Макроструктура сварной точки сплава АМг6 и рентгенограмма (внахлестку введен порошок молибдена)

При точечной сварке некоторых магниевых сплавов (МА-2) на периферии литого ядра образуются зоны, обогащенные марганцем, которые выявляются на рентгеновских снимках в виде светлых колец за счет большого поглощения марганцем рентгеновских лучей.

Рентгеновское просвечивание точечных и роликовых сварных соединений сплавов типа АМг6, АМг и АМц не выявляет размеров литой зоны; снимки характеризуют лишь размеры вмятин от электродов и чешуйки шва. При сопоставлении расположения дефектов на рентгенограммах с размерами литой зоны последние в случае сплавов типа АМг6, АМг, АМц определяются по макрошлифам или на образцах технологической пробы. Размеры литой зоны сварных соединений легких сплавов можно установить по рентгенограмме, если перед сваркой на соединяемые поверхности деталей нанесен порошок вольфрама или молибдена, размешанный в грунте. В процессе сварки порошок оттесняется на периферию литой зоны d и пластического пояска d_1 (рис. 3).

Для определения разрушающих усилий точек на срез и роликовых швов на разрыв производятся механические испытания контрольных образцов (5—

10 шт.). В случае, если в узле точки работают на отрыв, необходимо осуществлять такие же механические испытания образцов.

Образцы для механических испытаний точек на срез выполняются одноточечными или многоточечными. Многоточечные образцы выполняют с тем же шагом, что и сварной узел; в этом случае учитывается шунтирование сварочного тока через ранее выполненные точки, что имеет существенное значение при сварке точек с шагом, меньшим, чем указано в табл. 1.

Минимальные разрушающие усилия точек и роликовых швов для соответствующих материалов указаны в табл. 11, 12. Для разноименных сплавов они устанавливаются для сплава с меньшей прочностью.

11. Минимально допустимые усилия сварных точек на срез (плоские образцы) в *кГ*

Толщина тонкой детали в соединении в *мм*	Минимальный диаметр *ядра* точки в *мм*	Алюминиевые сплавы при $\sigma_в$ в *кГ/мм²*				Магниевые сплавы при $\sigma_в = 24 \div 30$ *кГ/мм²*
		до 13	от 13 до 20	св. 20 до 32	св. 32	
0.3	2.5	10	15	30	35	—
0.5	3.0	35	45	55	70	50
0.8	3.5	75	95	105	135	100
1.0	4.0	100	130	140	160	140
1.2	5.0	130	170	180	220	190
1.5	6.0	165	230	250	330	270
2.0	7.0	235	345	385	480	350
2.5	8.0	315	430	540	670	400
3.0	9.0	360	470	650	890	550
4.0	12.0	650	850	1100	1500	850
5.0	14.0	1100	1350	1875	2600	—
6.0	16.0	—	1825	2550	3450	—
7.0	17.0	—	2200	3050	4150	—

12. Минимально допустимые разрушающие напряжения на статический срез (разрыв) роликовых швов в % от $\sigma_в^*$ основного материала (плоские образцы)

Толщина тонкой детали в соединении в *мм*	Минимальная ширина литой зоны в *мм*	Алюминиевые сплавы при $\sigma_в$ в *кГ/мм²*			Магниевые сплавы при $\sigma_в = 24 \div 30$ *кГ/мм²*
		до 23	св. 23 до 32	св. 32	
0.3	2.5	100	90	70	—
0.9	3.0	100	85	65	—
1.8	3.5	100	80	60	65
1.0	4.0	100	80	60	65
1.2	5.0	100	75	55	60
1.5	6.0	100	75	55	60
1.8	6.5	100	75	50	55
2.0	7.0	100	70	45	55
2.5	7.5	100	65	40	50
3.0	8.0	100	60	40	50
3.5	9.0	90	55	40	—
4.0	10.0	90	50	35	—
5.0	12.0	90	45	30	—

* Для $\sigma_в \leqslant 15$ *кГ/мм²* напряжения приняты за 100%.

При работе сварочных машин по различным причинам возможно рассогласование между настройкой машины (положение ручек) и режимом сварки. Поэтому для получения сварных соединений высокого качества необходимо осуществлять периодический контроль фактических значений параметров режима посредством их измерения. Измерения параметров производятся при определении новых режимов сварки, непосредственно в процессе сварки узлов, а также при периодической проверке сварочного оборудования. Для измерения параметров режима могут быть применены приборы: АСД-1 (действующее значение тока однофазных машин), АСУ-1М (амплитудное и действующее значение тока машин всех типов), СП-2 (длительность протекания тока однофазных машин), динамометры ДПС (усилие электродов), а также осциллографы С1-19, С1-4 (ЭНО-1) и Н-102 (МПО-2) в сочетании с датчиком тока ДСТ-2М.

При контроле герметичности испытывают как отдельные швы, так и все изделие в целом. Швы открытых конструкций проверяют керосино-меловой пробой. Швы резервуаров проходят гидравлические или пневматические испытания, а также испытания с применением гелиевого течеискателя. При гидравлических и пневматических испытаниях резервуаров под давлением свыше атмосферного необходимо обеспечить безопасность обслуживающего персонала. Основными

причинами негерметичности роликовых швов являются малое перекрытие литых зон шва (менее 25%), недостаточные размеры литой зоны и внутренние выплески. Устранение негерметичности производится повторной роликовой или точечной (с перекрытием точек) сваркой или разделкой нахлестки и последующей подваркой аргоно-дуговой сваркой.

Прочность сварных соединений

При испытаниях на срез точки разрушаются как со срезом литого металла, так и с вырывом ядра из основного металла. С вырывом обычно разрушаются точки более пластичных сплавов (АМц, АМг), со срезом — точки высокопрочных сплавов (Д16Т, АМг6). Однако четкого разграничения по характеру разрушения нет, и в зависимости от размеров литой зоны, величины нахлестки и ширины испытываемого образца могут иметь место как срез, так и вырыв точек.

Статическая прочность точечных соединений определяется практически величиной диаметра литого ядра. Так, при увеличении диаметра ядра прочность растет примерно пропорционально площади сечения его в плоскости соединяемых листов. Однако на практике нет необходимости увеличивать диаметр ядра точек сверх величин, приведенных в табл. 1 для соответствующих толщин. Повысить прочность можно уменьшением шага точек в ряду и увеличением числа рядов. Следует отметить также, что увеличение диаметра ядра влечет за собой рост нахлестки против значений, приведенных в табл. 1, что повышает вес сварных конструкций. При постановке точек в два ряда прочность соединения при их шахматном расположении несколько выше, чем при рядном, так как в первом случае нагрузка более равномерно распределяется между всеми точками соединения. При расчете многоточечных соединений можно считать, что их прочность равна прочности одной точки, умноженной на число точек. Однако расчетная прочность одной точки должна быть снижена на 10—15% по сравнению с прочностью одноточечного соединения, так как из-за большей жесткости многоточечного соединения усилия между точками распределяются неравномерно.

Прочность точечных соединений при испытаниях на статический срез зависит также от формы соединяемых элементов. Так, если соединения осуществляются встык с накладкой в виде профиля различного сечения, то прочность соединений обычно на 10—12% выше прочности соединений плоских листов. Поэтому рекомендуется для определения прочности соединений, применяемых в сварных узлах, испытывать не плоские образцы, а образцы типовых соединений.

При испытаниях контрольных образцов на срез, а также при расчетах пользуются минимальной допускаемой прочностью сварных точек на срез, приведенной в табл. 11, которая установлена из расчета минимального размера литой зоны и с учетом возможного разброса прочности соединений. Эта прочность устанавливается на 20—25% меньше средней прочности точек при минимальных размерах диаметра литого ядра.

При испытаниях точек на отрыв обычно применяют крестообразные образцы. Разрушение при отрыве происходит в большинстве случаев со сквозным вырывом литого металла по околошовной зоне, встречаются также и случаи несквозного вырыва литого металла. Прочность сварных точек на отрыв составляет в среднем 25% от прочности точек на срез.

Для определения прочности роликовых соединений, последние испытывают на срез (разрыв). Разрушение образца с качественными швами всегда происходит с разрывом листа по околошовной зоне или основному металлу. При испытаниях роликовых образцов, так же как и точечных, имеет место изгиб пластин, вследствие эксцентричного приложения растягивающих сил, причем изгиб образца в бо́льшей степени, нежели в точечных соединениях, снижает их прочность. С повышением толщины свариваемых листов из-за увеличения эксцентрицитета нагрузки прочность швов резко понижается (табл. 12). В реальных конструк-

циях роликовые швы, как правило, работают без изгиба, практически на чистый разрыв, таким образом, прочность соединений в конструкциях всегда будет больше, чем на плоских образцах.

Стыковая сварка алюминиевых сплавов

Для соединения алюминиевых сплавов обычно применяют стыковую сварку оплавлением, хотя для малых сечений может быть применена и сварка сопротивлением. При сварке оплавлением достигается равномерный нагрев сечения деталей, а образующиеся окислы легко удаляются из стыка при выдавливании жидкого металла. Высокая тепло- и электропроводность алюминиевых сплавов требует высоких плотностей сварочного тока. Большая склонность к окислению с образованием прочной тугоплавкой окисной пленки (Al_2O_3) делает необходимым проводить сварку с высокими скоростями оплавления и осадки при наличии значительных усилий осадки. Вследствие больших усилий осадки происходит разрушение окисной пленки и выдавливание ее из стыка свариваемых деталей. Существует вполне определенная зависимость между скоростью и усилием осадки. При более высокой скорости осадки могут быть применены сравнительно меньшие усилия сжатия, так как процесс завершается при более высокой температуре и меньшем окислении.

При стыковой сварке алюминиевых сплавов наблюдается сильное искривление волокон в месте стыка и большая высадка металла. Зона пластической деформации у различных сплавов отличается степенью и характером структурных изменений. По линии стыка обычно наблюдается скопление легких частиц избыточных фаз. Искривление волокон создает неблагоприятное расположение слоев металла относительно действия внешних сил сжатия. Это приводит в ряде случаев к значительному понижению пластичности сварного соединения. Пластические и прочностные свойства соединений могут быть улучшены применением стыковой сварки в условиях объемного сжатия.

Свариваемый профиль устанавливают в приспособление, охватывающее его по всему сечению и жестко фиксирующее в зоне сварки стальными или керамическими формирующими элементами, связанными с медными токоведущими губками. Профили с малой разностенностью и сечением до 500—600 *мм*^{2} можно сваривать при нагреве сопротивлением при плотности тока 80—120 *а/мм*^{2}; скорость осадки 220—250 *мм/сек*, удельное давление осадки 30—55 *кГ/мм*^{2}. Профили с большой разностенностью и сечением до 1600 *мм*^{2} сваривают при нагреве оплавлением. Плотность тока оплавления 7—9 *а/мм*^{2} при скорости оплавления 4—10 *мм/сек*. Плотность тока при осадке 160—200 *а/мм*^{2}, удельное давление 35—70 *кГ/мм*^{2}.

Сварка деталей большого сечения затрудняется ввиду увеличенного отвода тепла от стыка в глубь деталей, что тормозит процесс расплавления и разрушения перемычек. Для предупреждения этого применяют предварительный подогрев деталей током при плотности 18—22 *а/мм*^{2}, который уменьшает теплопроводность свариваемого материала.

Размеры и форма сечения двух свариваемых деталей должны быть на некоторой длине одинаковыми для получения равномерного их разогрева. При сварке конструкций замкнутой формы (шпангоуты, кольца и т. д.) режимы сварки по току должны быть несколько повышены с учетом потерь на шунтирование. В отдельных случаях для уменьшения шунтирования повышают индуктивное сопротивление введением на пути шунтирования тока больших ферромагнитных масс.

Отмечено, что устойчивость процесса оплавления повышается при уменьшении активного и индуктивного сопротивлений сварочного контура. При сварке оплавлением алюминиевых сплавов удельная мощность не сильно отличается от удельной мощности при сварке сталей. Повышенная же мощность стыковых машин определяется большой мощностью, необходимой при осадке (в 5—6 раз превышающей мощность при оплавлении).

При сварке на характер оплавления может оказать влияние несимметричный относительно оси деталей подвод сварочного тока, вследствие чего плотность тока по сечению деталей неодинакова, что может привести к неравномерному оплавлению. Поэтому следует делать симметричный токоподвод.

Стыковую сварку деталей небольших сечений можно производить на обычных машинах после модернизации привода давления, которая в основном заключается в повышении скорости оплавления и осадки.

Для сварки алюминиевых и некоторых цветных сплавов применяют машины типа МСЦ-25, МСПТ-150. Машина МСЦ-25 предназначена для сварки оплавлением трубок диаметром 8—12 *мм* с толщиной стенок 1—2 *мм*, а также для сварки других деталей сечением до 50 *мм*^{2}. На машине МСПТ 150 может выполняться сварка деталей сечением до 250 *мм*. Сварка больших сечений может выполняться также на модернизированной машине К-155.

Прочность стыковых сварных соединений алюминиевых сплавов обычно несколько ниже основного материала. Исходное состояние сплава существенно влияет на прочностные характеристики соединений. При сварке в условиях объемного сжатия высокопрочных алюминиевых сплавов (Д16АТ, АМг6) соединения имеют прочность на 10—15% ниже основного материала.

СВАРКА БЕРИЛЛИЯ

Бериллий обладает уникальными физическими свойствами, благодаря которым он является одним из перспективных конструкционных материалов при создании космических аппаратов, сверхзвуковых самолетов, ядерных реакторов, гироприборов и т. д. [3].

Конструкционный бериллий изготовляют методом порошковой металлургии (горячее прессование порошка бериллия в вакууме при 450—500° С). Горячепрессованные брикеты являются исходным материалом для прокатки и других видов обработки [34].

Бериллий — хрупкий металл, что в основном определяется его кристаллической структурой (гексагональная плотноупакованная; при 1240—1260° С происходят фазовые превращения), наличием в нем вредных примесей и текстурой [31]. Хрупкость бериллия особенно проявляется в литом состоянии, причем величина зерна и его ориентировка оказывают большое влияние на механические свойства этого металла [32]. При высоких температурах бериллий обладает высокой химической активностью по отношению к кислороду, азоту, водороду, галогенам и т. д.

Бериллий в тонкоизмельченном виде и окись BeO обладают высокой токсичностью, что определяет повышенные требования к технике безопасности при работе с этим материалом.

Дуговая сварка вольфрамовым электродом в камере с контролируемой атмосферой. Возможна как ручная, так и автоматическая сварка. Перед заполнением инертным газом (аргоном или смесью аргона с 50% гелия) в камере создается разряжение $1 \cdot 10^{-3}$—$5 \cdot 10^{-4}$ *мм рт. ст.* Инертный газ перед заполнением дополнительно очищают от кислорода и азота и сушат. Давление его в камере должно быть избыточным ($p = 0{,}2$ *кГ/см*^{2}).

Для очистки мест сварки от окисной пленки деталь протравливают при комнатной температуре в ванне с 40% HNO_3, 2% HF и 58% H_2O. Время травления зависит от размера детали [29]. После травления детали промывают в воде и сушат.

Расплавленный бериллий при высоких температурах может вступать во взаимодействия со многими металлами с образованием химических соединений и твердых растворов. Это может вызвать растрескивание и пористость шва. Поэтому детали сборочно-сварочных приспособлений, находящиеся в непосредственном контакте со швом (подкладки и т. п.), рекомендуется изготовлять из нержавеющей стали аустенитного класса с покрытием из окиси алюминия толщиной 0,1 *мм* [29].

В подавляющем большинстве случаев для дуговой сварки бериллия применяют переменный ток, который вследствие «катодного распыления» позволяет разрушить пленку окиси, образующуюся в процессе сварки на поверхности ванны [29]. Есть указания о сварке бериллия постоянным током прямой полярности [30]. На рис. 4 приведен график оптимального сварочного тока, обеспечивающего удовлетворительное формирование сварных швов при ручной дуговой сварке листов толщиной 1,27—6,35 *мм*. С ростом сварочного тока увеличивается размер зерна, что является одной из причин образования в швах горячих трещин и пористости. Повышение тока на 25% по сравнению с оптимальной величиной приводит к увеличению размера зерна в поперечном сечении на 50% [29].

При дуговой сварке вольфрамовым электродом в контролируемой атмосфере основными дефектами соединений являются продольные и поперечные трещины в швах, возникающие в момент кристаллизации. Эти трещины носят межкристаллитный характер, что указывает на их образование при высокой температуре. В месте трещин обнаруживается структурная составляющая, появление которой связывают с присутствием в бериллии алюминия, образующего с ним легкоплавкую эвтектику (температура образования эвтектики 644° С). Отмечается, что при сварке бериллия, содержащего меньше 0,064% алюминия, продольные трещины в швах отсутствуют. Для ликвидации трещин в швах рекомендуется подогрев изделия перед сваркой. Повышение сварочного тока и скорости сварки для предотвращения горячих трещин должно сопровождаться увеличением температуры предварительного подогрева. Так, например, для избежания трещин в шве, выполненном на бериллии толщиной 3,0 *мм* током 150 *а* при скорости сварки 10 *м/ч*, необходим предварительный подогрев до 260° С, а при токах 225—400 *а* и скорости сварки 16,8—23,0 *м/ч* — 600° С.

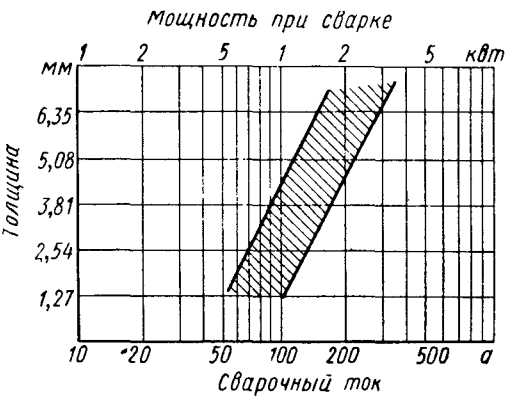


Рис. 4. График рекомендуемого сварочного тока для ручной дуговой сварки бериллия вольфрамовым электродом в контролируемой атмосфере (смесь аргона и 50% гелия) [29]

Отмечается [29], что последующая термическая обработка в вакууме при 825° С с выдержкой 30 *мин* заметно увеличивает прочность на растяжение и относительное удлинение сварных соединений.

Электроннолучевая сварка. Наиболее перспективна сварка электронным лучом в вакууме [32]. Установлено, что с понижением давления в камере наблюдается возрастание интенсивности возгонки бериллия. При давлении $1 \cdot 10^{-4}$ *мм рт. ст.* теоретически температура точки кипения (1170° С) ниже точки плавления (1285° С) бериллия. При давлении $1 \cdot 10^{-5}$ *мм рт. ст.* происходит еще более интенсивная возгонка. Предполагается, что при очень высокой плотности электронного луча наиболее вероятна возгонка металла, чем его расплавление.

На рис. 5 показано взаимное влияние тепловложения и давления в камере на способность бериллия к возгонке и диапазон режимов сварки, выше которого наблюдается появление трещин, вызванных значительными термическими напряжениями. В табл. 13 приведены режимы сварки бериллия.

Электроннолучевая сварка бериллия при низком ускоряющем напряжении (9—14 *кв*) приводит к значительному росту зерна. Предполагается, что соединение этого металла при высоком напряжении и высоких скоростях сварки

может привести к получению мелкозернистой структуры металла шва. Величина зерна металла шва при сварке электронным лучом оказывает значительное влияние на прочность (рис. 6). Результаты испытаний на растяжение стандартных плоских образцов приведены на рис. 7. Сварные образцы разрушаются как по основному металлу, так и по

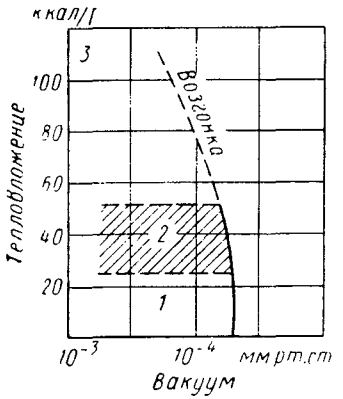


Рис. 5. Влияние тепловложения и давления в камере на способность возгонки бериллия и рекомендуемый диапазон режимов сварки [32]: *1* — область режимов, обеспечивающих получение сварных соединений без дефектов; *2* — область режимов, приводящих к образованию горячих трещин в швах; *3* — область режимов, приводящих к образованию холодных трещин в сварных соединениях

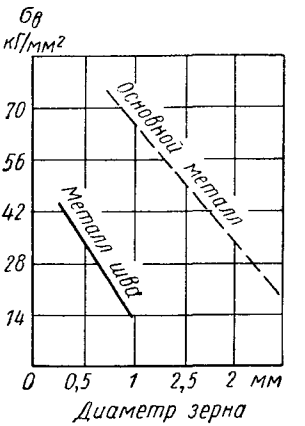


Рис. 6. Зависимость предела прочности основного металла и металла шва от величины зерна [32]

пву, причем существует значительный разброс в значении прочности (от 7 до 38 *кГ/мм*²). Это связано с первую очередь с наличием на образцах поверхностных дефектов. Электролитическая полировка образцов после сварки позволяет получить более стабильные результаты.

Диффузионно-вакуумная сварка. Процесс заключается в пластической деформации, рекристаллизации и сращивании зерен по поверхности раздела при высоких температурах и разряжении в камере $5 \times \times 10^{-5}$—$1 \cdot 10^{-5}$ *мм рт. ст.*

13. Режим электроннолучевой сварки бериллия [32]

Толщина листов в *мм*	Ускоряющее напряжение в *кв*	Ток эмиссии в *ма*	Давление в камере в *мм рт. ст.*	Скорость сварки в *м/ч*
0,5	9,0	20	$8 \cdot 10^{-5}$	12
1,6	14,0	50	$8 \cdot 10^{-5}$	12

Установлено [32, 34], что прочность на разрыв сварного соединения бериллия, выполненного диффузионным методом, в значительной степени 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 975° С прочность уменьшается вследствие интенсивного роста зерна в основном металле. Максимальная прочность сварного соединения близка к прочности основного металла: 28 *кГ/мм*² при относительном удлинении 0,3—1,0% на образцах, полученных путем горячего прессования порошка бериллия,

и 42 *кГ/мм*^{2} при относительном удлинении 5,6% на образцах бериллия, подвергнутого после прессования горячей вытяжке.

Контактная сварка. Точечную сварку бериллия осуществляют [29] на серийных контактных машинах, оснащенных устройством для получения постепенного нарастания и спада тока.

Для уменьшения остаточных сварочных напряжений вокруг сварной точки, приводящих к образованию трещин, рекомендуется предварительный и последующий нагрев сварного соединения. Перед сваркой детали нагревают внешним источником до появления красноты. После завершения цикла сварки внешний источник отключают.

Испытания растяжением на срез сварных соединений бериллия толщиной 0,4 *мм* показали, что при комнатной температуре нагрузка разрушения составила 70 *кГ* (излом хрупкий).

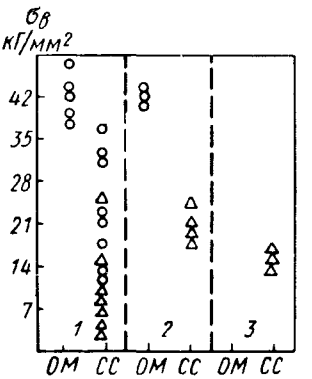


Рис. 7. Прочность основного металла и сварного соединения бериллия, выполненного электронолучевой сваркой [32]: *ОМ* — основной металл; *СС* — сварные соединения: *О* — разрушения по основному металлу; Δ — разрушение по шву; *1* — горячекатаные пластины толщиной 0,5 *мм*; *2* — то же 1,6 *мм*; *3* — прессованные пластины толщиной 1,6 *мм*

СВАРКА МЕДИ И МЕДНЫХ СПЛАВОВ

Основные свойства и особенности сварки

Основные свойства. Медь кристаллизуется в гранецентрированной кубической решетке с координационным числом $K = 12$ и стороной зуба $a = 3{,}6147$ Å. Полиморфизмом медь не обладает, и фазовые превращения ее связаны только с изменением агрегатного состояния:

Температура плавления в °С	1083
Удельная теплота превращения в *кал/г*	48,7
Температура кипения в °С	2596
Удельная теплота превращения в *кал/г*	1140

Плотность твердой меди в *г/см*^{3} меняется в зависимости от обработки:

Медь электролитическая	8,914
Медь литая	8,93
Медь деформированная (проволока)	8,94

Коэффициент термического расширения твердой меди при 20° С $\alpha = 16{,}4 \times 10^{-6}$°С$^{-1}$. Плотность меди в процессе плавления резко падает и в дальнейшем линейно уменьшается в зависимости от температуры:

Температура в °С	1100	1125	1150	1175	1200	1250
Плотность жидкой меди в *г/см*^{3}	8,36	8,35	8,34	8,33	8,32	8,30

Теплоемкость твердой меди при 20°С равна 0,09 *кал/г*°С и мало зависит от температуры.

Теплопроводность меди очень высокая; при 20°С коэффициент теплопроводности $\lambda = 0{,}923$ *кал/см·сек·град* и довольно сильно зависит от температуры:

Температура в °С	−252,2	−200	−190	0	100	300	970
λ в *кал/см · сек · град*	29,3	1,95	1,42	0,98	0,90	0,88	0,738

Медь обладает сравнительно небольшой летучестью, но при температурах сварки упругость насыщенного пара будет уже значительна (20—100 *мм рт. ст.*), что следует учитывать при проектировании вентиляции сварочных постов

Электропроводность меди очень велика, удельное электрическое сопротивление при 20°С $\rho = 1{,}682$ *мком·см*, и в этом отношении медь уступает только серебру ($\rho = 1{,}5$ *мком·см*). При повышении температуры удельное сопротивление растет, достигая при 970°С величины 9,6 *мком·см*. При температуре плавления сопротивление жидкой меди более чем в 2 раза превышает удельное сопротивление твердой меди. Электропроводность и теплопроводность меди резко снижаются при содержании даже небольших количеств примесей.

Механические свойства меди сильно зависят от предварительной обработки металла и степени его чистоты:

	Мягкая	Твердая
Модуль упругости в *кГ/мм²*	10 800	—
Предел прочности при растяжении в *кГ/мм²*	24	—
Относительное удлинение в %	50	6
Относительное сужение в %	75	35
Предел текучести в *кГ/мм²*	7	38
Ударная вязкость в *кГ/см²*	16—18	—
Твердость *НВ*	45	120

В промышленности используется медь различных марок и различной степени чистоты (табл. 14). Электрошлаковый переплав и вакуумная плавка меди резко снижают содержание в ней растворенных газов (водорода), улучшая этим ее пластические свойства.

14. Химический состав меди (по ГОСТу 859—66) (в %)

Марка меди	Содержание меди, не менее	Содержание примесей, не более					
		Bi	Sb	As	Fe	Ni	Pb
М00	99,99	0.0005	0,001	0.001	0.001	0.001	0,001
М0	99.95	0.001	0.002	0,002	0.004	0.002	0.004
М0б	99.97	0.001	0.002	0.002	0.004	0.002	0,004
М1	99.90	0.001	0.002	0.002	0.005	0.002	0,005
М1р	99.90	0.001	0.002	0.002	0.005	0.002	0,005
М2	99,70	0.002	0.005	0.01	0.05	0.2	0,01
М2р	99.70	0.002	0.005	0.01	0.05	0.2	0,01
М3	99.50	0.003	0,05	0.05	0,05	0.2	0,05
М3р	99,50	0.003	0.05	0.05	0,05	0.2	0,03
М4	99.0	0.005	0,2	0.2	0,1	—	0,3

Марка меди	Содержание меди, не менее	Содержание примесей, не более						
		Sn	S	O	Zn	P	Ag	Всего
М00	99.99	0,001	0,002	—	0,001	0,001	—	0,01
М0	99.95	0,002	0,004	0.02	0,004	0,002	0.003	0,05
М0б	99,97	0,002	0,004	Отсутствует	0,003		0.003	0.03
М1	99.90	0,002	0,005	0,05	0.005	—	0.003	0.1
М1р	99.90	0.002	0.005	0,01	0.005	0.04	0.003	0.1
М2	99.70	0.05	0.01	0,07	—	—	—	0,3
М2р	99.70	0,05	0.01	0,01	—	0.04	—	0.4
М3	99,50	0.05	0,01	0,08	—	—	—	0.5
М3р	99,50	0.05	0.01	0.01	—	0,04	—	0,5
М4	99,0	—	0.02	0,15	—	—	—	1,0

Примечания: 1. Содержание серебра в меди марок М0 и М1 гарантируется, но не определяется.

2. По требованию заводов по обработке цветных металлов катодная медь М0 и М1 поставляется с содержанием серы не более 0.003%.

3. По соглашению сторон в полуфабрикатах, изготовляемых из слитков весом более 1 *т*, в меди марки М1 допускается содержание кислорода не более 0,08% и в меди М2 и М3 — не более 0,1%.

Медь является *d*-металлом I группы периодической системы Д. И. Менделеева. Строение внешних электронных уровней $3s^23p^63d^{10}4s^1$. Первые потенциалы ионизации

$$Cu^0 - e \rightarrow Cu^{+1}\ 7{,}724\ в;$$

$$Cu^0 - 2e \rightarrow Cu^{+2}\ 20{,}330\ в.$$

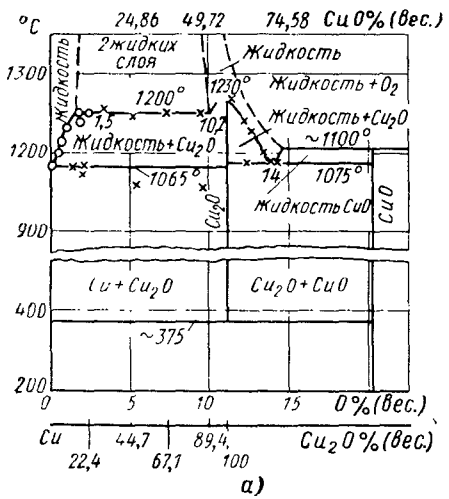
В своих химических соединениях медь проявляет валентность +1 или +2. Валентность +2 устойчива при низких температурах, а валентность +1 — при высоких:

$$CuO + Cu \rightleftarrows Cu_2O.$$

Стандартный потенциал растворения меди +0,34, и она не может реагировать с кислотами с выделением водорода. Хорошо растворяется в азотной кислоте с выделением окислов азота (NO, NO_2) и других окисляющих средах. Для травления медных шлифов и для химического фрезерования употребляются кислые растворы хлорного железа

$$Cu + 2FeCl_3 \rightarrow CuCl_2 + 2FeCl_2$$

(реакция идет без выделения газов, что повышает точность травления).



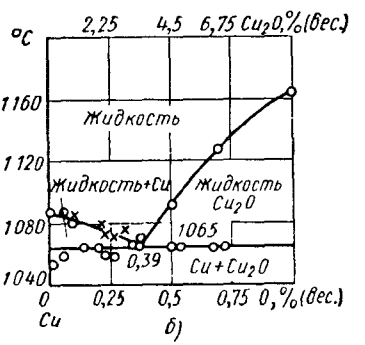


Рис. 8. Диаграмма плавкости системы медь — кислород: *а* — общая; *б* — верхний левый угол

При обычных температурах медь довольно инертна, при повышении температуры хорошо реагирует с кислородом, серой, фосфором и галогенами. С углеродом медь не дает устойчивых соединений (Cu_2C_2 — взрывчатая ацетиленистая медь). С азотом не реагирует и он может использоваться как защитный газ при сварке чистой меди. С водородом медь дает очень неустойчивый гидрид CuH, существующий до температуры 100°С.

Образование твердых и жидких растворов между медью и ее соединениями меняет ее химическое сродство и приводит к довольно сложным диаграммам плавкости.

Наибольший интерес представляет собой система медь — кислород (рис. 8), так как при высоких температурах сварки медь может окисляться или кислородом газовой атмосферы или за счет окислительных свойств флюсов.

Сродство меди к кислороду увеличивается при растворении окисла меди в жидком металле, стремясь к бесконечности при уменьшении концентрации кислорода в растворе до нуля. Растворимость кислорода или закиси меди в жидкой меди весьма значительная (см. рис. 8, *а*, *б*). При кристаллизации окисленной

меди выпадает эвтектика Cu — Cu_2O и образуется свободная фаза Cu_2O, что резко снижает сродство меди к кислороду. Cu_2O в эвтектике может легко восстанавливаться растворенными в меди газами:

$$Cu_2O + 2H \rightarrow 2Cu + H_2O;$$

$$Cu_2O + CO \rightarrow 2Cu + CO_2.$$

Выделяющиеся при этом газы не растворяются в металле и нарушают металлическую связь между зернами, приводя к образованию трещин — «водородная болезнь» меди. Твердые растворы кислорода в меди имеют исчезающие малые концентрации кислорода [23] и не могут существенно влиять на этот процесс. Поэтому медь в процессе сварки плавлением всегда надо защищать от окисления или тщательно раскислять ее.

Водород сильно влияет на качество сварных соединений из меди и ее сплавов, вызывая пористость или образование трещин. Водород в меди растворяется довольно значительно и его растворимость подчиняется закону Сивертса. При условии постоянного давления водорода над медью растворимость будет зависеть только от температуры (рис. 9). Растворимость водорода в меди ниже, чем в железе, но изменение растворимости водорода в процессе кристаллизации для меди относительно больше, чем для железа. Скорость охлаждения при сварке меди, ввиду ее исключительно высокой теплопроводности, значительно выше, чем при сварке сталей, и водород не успевает покинуть металл за счет десорбции.

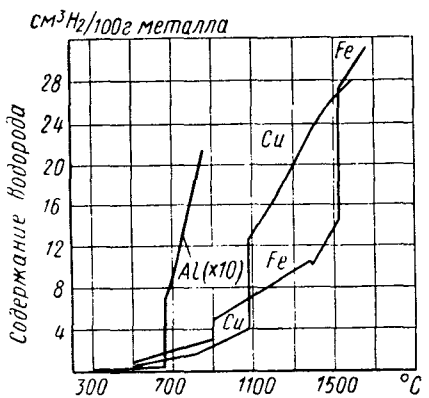


Рис. 9. Изобары растворимости водорода в меди и железе [23] (давление водорода p = = 1 кГ/см²)

Сочетание указанных факторов делает медь гораздо более чувствительной к водороду при сварке (поры, трещины), чем, например, стали. Наличие растворенного кислорода в жидкой меди понижает в ней растворимость водорода [23].

Влияние легирующих компонентов. Все сплавы на основе меди можно разделить на два типа: латуни (Л) и бронзы (Бр.). Латуни содержат в основном медь и цинк, но специальные латуни могут содержать и ряд других компонентов. Бронзы представляют собой сплавы на основе меди, содержащие не более 4—5% Zn.

Основными легирующими компонентами бронз являются: Al, Mn, Sn, Be, Si, Cr. Бронзы, так же как и латуни, могут содержать одновременно несколько компонентов.

Составы сплавов на основе меди определяются ГОСТами 493—54*, 492—52*, 5017—49, а также «Цветные металлы и сплавы. Классификация и технические условия» (М., Стандартгиз, 1962) и «Цветные металлы и сплавы. Методы испытания», часть I и II (М., Стандартгиз, 1964).

Латуни и томпак представляют собой медноцинковые сплавы, содержание цинка в которых не выходит за пределы α твердого раствора в диаграмме плавкости Cu — Zn.

Наибольшее количество цинка (38%) содержит латунь марки Л-62. В латуни Л-59 имеется и β'-фаза. В пределах α-твердого раствора свойства латуней постепенно изменяются, увеличивая прочность меди и снижая ее пластичность. Латуни обладают хорошей коррозионной устойчивостью, теряя ее только в аммиачных средах (растрескивание). При больших содержаниях цинка возможно

образование интерметалидов ($CuZn$, $CuZn_2$ и т. д.), при этом механические свойства резко ухудшаются.

В процессе сварки латуней цинк теряется за счет испарения из расплава, так как обладает высокой упругостью пара (температура кипения 907°С).

Специальные латуни (ЛА77-2, ЛАЖ60-1-1, ЛАН59-3-2 ЛК80-3, ЛМц58-2 и др.) могут содержать, кроме цинка, алюминий, кремний, железо, никель и другие компоненты.

Бронзы оловянистые имеют состав также в пределах α-твердого раствора (до 10% Sn). Механические свойства изменяются постепенно: с ростом предела прочности при растяжении $\sigma_в$ наблюдается снижение пластичности (δ, ψ). Многокомпонентные оловянистые бронзы могут, кроме олова, содержать фосфор (Бр. ОФ 6,5-0,4 и др.), цинк (Бр. ОЦ4-3), никель и даже свинец (Бр. ОЦС4-4-4), который придает хорошие антифрикционные свойства сплаву.

Наличие фосфора и свинца резко ухудшает свариваемость бронз ввиду образования низкоплавких эвтектик.

Бронзы алюминиевые получили большое распространение в технике благодаря своим высоким механическим свойствам и высокой коррозийной стойкости. Составы алюминиевых бронз также находятся в пределах концентраций α-твердого раствора (до 7,4% Al). Алюминий также упрочняет медь (Бр. А7 $\sigma_в \approx$ ≈ 50 *кГ/мм*^{2}).

Многокомпонентные алюминиевые бронзы содержат железо (Бр.АЖ 9-4), марганец (Бр.АЖМц 10-3-1,5) и т. д.

Сварка алюминиевых бронз вызывает загрязнение металла шва включениями Al_2O_3. Образование прочных оксидных слоев требует подготовки кромок для сварки и пайки изделий.

Бронзы марганцовистые обладают высокими механическими свойствами, так как марганец, упрочняя медь, в меньшей степени снижает пластичность. Диаграмма плавкости системы Cu — Mn указывает на неограниченную растворимость марганца как в жидком, так и в твердом состоянии. Однако содержание марганца ограничивается в бронзах 20%, так как при большем содержании марганца твердые растворы подвергаются превращениям и сплавы уже не будут однофазными. Марганцовистые бронзы обладают коррозионной стойкостью и жаропрочностью.

Бронзы кремнистые обычно имеют сложный состав и, кроме кремния, содержат марганец (Бр.КМц 3-1), никель (Бр.КН-0,5-2) и другие элементы. Кремний с медью образует сложную диаграмму плавкости, в которой область α-твердого раствора ограничена приблизительно 3,5% Si. Кремнистые бронзы обладают высокими механическими свойствами, коррозионностойки, антифрикционны и износоустойчивы.

Свариваемость кремнистых бронз хорошая, процесс сварки не требует какой-либо особой защиты зоны сварки, так как легирующие компоненты являются хорошими раскислителями.

Бронзы хромистые в последнее время получили широкое применение, так как упрочнение, вызываемое хромом, не снижает существенно электропроводности сплава по сравнению с чистой медью. Растворимость хрома в твердой меди очень мала (0,55% Cr) и при увеличении содержания хрома сплав становится гетерофазным. Бр.Х0,5 и Бр.Х0,8 обладают хорошей свариваемостью.

Бронзы бериллиевые представляют собой термически упрочняемые сплавы, так как граница твердых растворов исчезает при 300°С. В упрочненном состоянии Бр.Б2,5 представляет собой немагнитный сплав, обладающий механическими свойствами, соответствующими свойствами сталей (пружины, гибкие элементы), а также высокой коррозионной стойкостью.

При сварке следует предусматривать усиленную вентиляцию и защиту оператора-сварщика (пары бериллия — ядовиты!).

Мельхиоровые сплавы (МН95-5 и др.) свариваются хорошо, так как никель неограниченно растворим в меди в жидком и твердом состоянии. Растворяя водород, никель может обогащать им сплав и увеличивать пористость швов.

Железо как компонент медных сложнолегированных сплавов (латуни, бронзы) не оказывает существенного влияния на свариваемость, так как обычно находится в малых концентрациях. Влияние железа начинает проявляться при наплавке меди и ее сплавов на сталь и при сварке стали с медью. В диаграмме

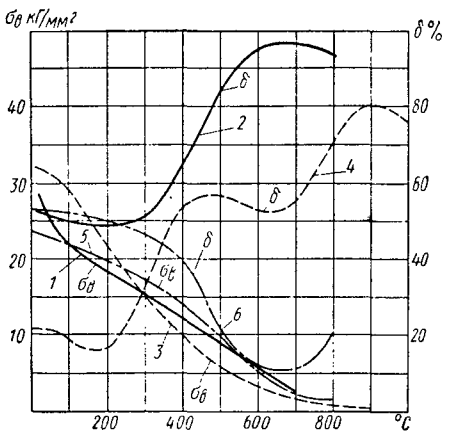


Рис. 10. Изменение механических свойств меди различной чистоты в зависимости от температуры [20]: *1* и *2* — бескислородная медь высокой чистоты; *3* и *4* — медь с содержанием кислорода 0,04%; *5* и *6* — медь с содержанием свинца 0,036%

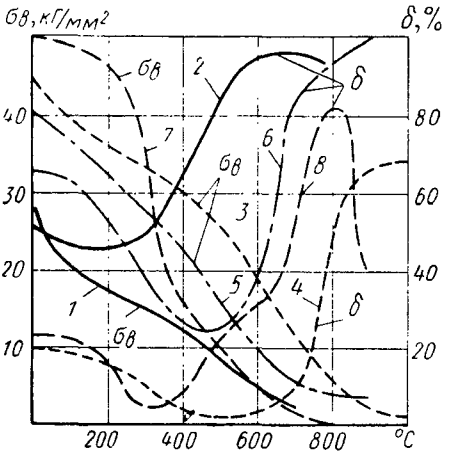


Рис. 11. Изменение механических свойств меди и ее сплавов в зависимости от температуры [20]: *1* и *2* — чистая медь; *3* и *4* — Бр.Х0,5; *5* и *6* — Бр.А5; *7* и *8* — Л-68

плавкости медь — железо существует ликвационная область в жидком состоянии и два твердых раствора: меди в железе и железа в меди. Медь обладает высоким коэффициентом диффузии между кристаллическими зернами железа, и в результате наплавленный слой мягкой меди может содержать включения из железа и твердых растворов, обладающих большой твердостью и ухудшающих свойства наплавленного слоя.

Для повышения качества слоев необходимо регулировать время пребывания медной ванны в жидком состоянии.

Свинец и висмут сильно снижают свариваемость, резко увеличивая интервал кристаллизации за счет образования легкоплавких эвтектик. В сплавах (ЛКС65-1,5-3; Бр.ОЦС4-4-4 и др.) свинец обычно присутствует в виде глобулярных включений, улучшая антифрикционные свойства. Сварку следует производить в условиях жесткого закрепления и освобождать изделие после охлаждения до температуры ниже 300°С.

Сера и фосфор ухудшают свариваемость медных сплавов. Фосфор дает легкоплавкие эвтектики, увеличивает интервал кристаллизации и, несмотря на его свойства как раскислителя, его следует избегать при сварке.

Влияние серы в медных сплавах сходно с ее влиянием при сварке стали.

Изменение свойств в зависимости от температуры. При сварке меди и ее сплавов следует учитывать изменение механических свойств в зависимости от температуры и содержания примесей, которые могут ухудшать свариваемость (рис. 10 и 11). Резкое снижение $\sigma_в$ у латуни Л-68 делает ее практически равнопрочной с медью уже при температуре около 600°С. Наиболее прочным в области высоких температур оказывается сплав Бр.Х 0,5.

Применение чистой меди определяется ее специфическими физическими

свойствами: электро- и теплопроводностью, прочностью и пластичностью, которые сильно зависят от чистоты металла. Поэтому в процессе сварки не должно происходить загрязнения меди какими-либо примесями, влияющими на эти свойства. Особые требования предъявляются к сварке вакуум-плотных соединений электронной техники и охлаждаемых водой узлов аппаратуры, работающей в очень тяжелых условиях.

Основные способы сварки

Сварка чистой меди существенно отличается от сварки сталей, ввиду ее специфических физических свойств. К таким свойствам относятся:

а) высокая тепло- и температуропроводность, что приводит к очень высоким скоростям охлаждения, малому времени пребывания сварочной ванны в жидком состоянии и к необходимости применения повышенной погонной энергии по сравнению со сталями;

б) значительный коэффициент термического расширения и его зависимость от температуры, что вызывает необходимость сварки в жестком закреплении или по прихваткам. При большой толщине материала следует регулировать толщину зазора при сборке;

в) малое время существования сварочной ванны в жидком состоянии, что ограничивает возможности ее металлургической обработки. В частности, при раскислении меди требуются более активные раскислители для завершения процесса раскисления в очень короткое время.

Большая чувствительность меди к водороду должна обязательно учитываться при разработке технологии сварки. Основные мероприятия по борьбе с его влиянием сводятся к снижению содержания водорода в зоне сварки (осушка газов, прокалка флюсов и т. д.)

Ацетилено-кислородная сварка. Сварка меди и ее сплавов пламенем газовой горелки — сравнительно малопроизводительный процесс, требующий от оператора-сварщика высокой квалификации. Однако при изготовлении единичных изделий, а также при выполнении ремонтных работ применение газовой сварки целесообразно.

Газовая горелка, тепловой источник малой сосредоточенности, что при большом теплоотводе в изделие затрудняет поддержание нормальной сварочной ванны. При сварке меди больших толщин (более 10 *мм*) целесообразно использовать две отдельные горелки, из которых первая создает предварительный подогрев изделия, а вторая осуществляет сварку. При двусторонней сварке двумя горелками необходимость в дополнительном подогреве отпадает.

Расход ацетилена для сварки меди при $\delta < 10$ *мм* $V_{C_2H_2} = 150\delta$ *л/ч* и при $\delta > 10$ *мм* $V_{C_2H_2} = 200\delta$ *л/ч*. При двух горелках расход ацетилена на подогрев $V_{C_2H_2} = 150 \div 200\delta$ *л/ч*, сварочной горелкой $V_{C_2H_2} = 100\delta$ *л/ч* (δ — толщина металла в *мм*). Медь и бронзу сваривают нормальным пламенем с отношением $\beta = \frac{V_{O_2}}{V_{C_2H_2}} = 1{,}05 \div 1{,}10$, а для латуней $\beta = 1{,}3 \div 1{,}4$ (для уменьшения потерь цинка) [5].

Несмотря на строгое регулирование пламени и защиту сварочной ванны продуктами горения ацетилена (CO; H_2; CO_2; H_2O) от окружающей воздушной среды, металл сварочной ванны, а следовательно, и сварного шва нуждается в раскислении, так как обогащается растворенной закисью меди. Процессы раскисления сварочной ванны при сварке меди и ее сплавов при газовой сварке осуществляется двумя путями: 1) извлечение растворенной закиси меди флюсами; 2) введение раскислителей через присадочный металл.

Ф л ю с ы. В состав флюсов вводят соединения бора (борная кислота, борный ангидрид, бура), в результате легкоплавкие шлаки, полученные при плавлении этих веществ, реагируют с растворенной закисью меди, переводят

ее в бораты меди, образующие легкоплавкие эвтектики с другими компонентами шлака.

Кроме бористых соединений флюсы могут содержать двузамещенные соли натрия и фосфорной кислоты, предварительно обезвоженные, хлориды и карбонаты натрия.

Состав некоторых флюсов приведен в табл. 15.

15. Составы флюсов для сварки меди и ее сплавов

Компоненты	Содержание компонентов в % во флюсах					
	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
Кислый фосфат натрия Na_2HPO_4	—	—	—	—	15	—
Поташ безводный K_2CO_3	—	—	—	—	—	22
Хлористый натрий NaCl	—	—	—	—	—	22

Флюсы наносят в виде порошка на предварительно нагретый металл или в виде пасты, покрывая свариваемые кромки на ширину 10—12 *мм*. При сварке флюс добавляют в ванну, окуная горячий пруток присадочного металла в порошок или нанося пасту на присадочный материал. В последнем случае проволоку протравливают в азотной кислоте, очищают от окисной пленки, промывают и покрывают пастой, замешанной на жидком стекле и имеющей состав: буры безводной 50%, угля древесного 20%, кислого фосфата натрия 15%, кремнезема 15%.

Для меди и, особенно, для латуни при сварке ацетилено-кислородной горелкой удобно применять газообразные флюсы, разработанные НИИАвтогеном. Газообразный флюс представляет собой пары азеотропного раствора борнометилового эфира с метиловым спиртом, которые через флюсопитатель подают непосредственно в пламя горелки, окрашивая его в зеленый цвет (спектральный цвет бора). В пламени горелки органическая часть флюса сгорает и остаются пары борного ангидрида B_2O_3, который и взаимодействует с металлом ванны. При сварке алюминиевых бронз во флюс надо вводить фториды и хлориды щелочных металлов, частично растворяющие Al_2O_3 (табл. 16).

16. Флюсы для сварки алюминиевых бронз

Компоненты	Содержание во флюсах в %			Компоненты	Содержание во флюсах в %		
	1	2	3		1	2	3
Хлористый натрий NaCl	30	45	28	Фтористый натрий NaF	—	—	8
Хлористый калий KCl	45	30	50	Фтористый калий KF	7	15	—
Хлористый литий LiCl	15	10	14	Кислый фосфат натрия Na_2HPO_4	3	—	—

Присадочный металл. При сварке чистой меди сравнительно малой толщины в качестве присадочного металла применяют проволоку М1 или М2, так как медь в этом случае не успевает сильно окисляться. При сварке меди большой толщины рекомендуется брать присадочный металл, содержащий раскислители (до 0,2% P и до 0,3% Si). Избыток раскислителей, легирующих металл шва, нежелателен, так как такие ценные свойства меди, как тепло-

и электропроводность, будут снижаться. Коррозионная стойкость меди в сварном соединении будет меньше, чем у основного металла.

При сварке сплавов меди чистота металла шва для сохранения высокой тепло- и электропроводности не является столь существенным условием. Поэтому применение раскислителей в присадочном металле не лимитируется так жестко. Если компоненты (Al, Si, Mn) сплава более активны, то сварку производят проволокой того же состава. При сварке латуней всегда наблюдается уменьшение содержания цинка, который испаряется из сварочной ванны и окисляется. Цинк значительно активнее меди и является по отношению к ней раскислителем. Поэтому для уменьшения потерь цинка следует применять в качестве присадочного металла кремнистую латунь (ЛК62-0,5) (62% Cu, 0,45—0,5% Si).

Для улучшения пластических и прочностных свойств шва его проковывают: при толщине до 4—5 *мм* в холодном состоянии, при большей толщине — после подогрева газовыми горелками до 400—800°С (в зависимости от толщины). После проковки следует провести отжиг. При правильно осуществленной технологии газовой сварки механические свойства сварного соединения приближаются к свойствам основного металла.

Сварка угольным электродом. Сварка меди угольным электродом применяется ограниченно. Она осуществляется дугой, горящей между изделием и угольным электродом, или независимым дуговым разрядом между двумя угольными электродами. Дуговой разряд является источником энергии при сварке, все технологические приемы, составы флюсов, присадочного металла сохраняются такие же, как и при газовой сварке. Используя в качестве присадочного металла проволоку из Бр. КМц3-1, можно производить сварку без каких-либо мер защиты. Механические свойства получаются удовлетворительными за счет сильного легирования металла шва марганцем и кремнием.

Сварка электродами с покрытием. Ручная электродуговая сварка электродами дает хорошие результаты в отношении прочностных свойств сварных соединений, но состав шва существенно отличается за счет легирования компонентами электродного покрытия и электродного металла. Сильное окисление металла шва требует применения раскислителей, избыточные концентрации которых легируют металл шва и меняют его теплофизические и электрические свойства. Составы металлических стержней и покрытия электродов приведены в табл. 17 и 18.

17. Химический состав проволоки для электродных стержней

Марка проволоки	Химический состав в %						
	Cu	Sn	Si	Mn	P	Zn	Примеси не более
М1	99,9	—	—	—	—	—	0,1
Бр.КМц 3-1	Ост.	—	2,75—3,5	1,0—1,5	—	—	0,10
Бр.ОФ 4-0,4	»	3,5	—	—	0,3	—	1,50
Л90	88—91	—	—	—		Ост.	1,50

18. Составы электродных покрытий (сухая шихта) в %

Покрытие ЗТ		Покрытие «Комсомолец-100»	
Марганцевая руда	17,5	Полевой шпат	12,5
Плавиковый шпат	32,0	Плавиковый шпат	15,0
Графит серебристый	16,0	Ферромарганец (низкоуглеродистый)	47,5
Ферросилиций	32,0	Кремнистая медь	25,0
Алюминий в порошке	2,5		

Сухую шихту заменивают на жидком стекле (класс А), которое составляет 20—25% от веса шихты. Технология соответствует технологии изготовления электродов основного типа.

Механические свойства соединений вполне удовлетворительны (табл. 19) [12]. Тепло- и электропроводность сварных соединений значительно ниже, чем у чистой меди, особенно при сварке электродами из сплавов меди.

19. Механические свойства металла[1] шва

Покрытие	Марка металло-электродного стержня	Механические свойства	
		$\sigma_в$ в $кГ/мм^2$	α°
«Комсомолец-100»	М1	18—20	180
ЗТ	М1	17—20	150—180
	Бр.КМц3-1	19—23	180
	Бр.ОФ4-0,3	20—23	180
	Л90	20—23	180

[1] Толщина 2—4 *мм*.

Помимо приведенных покрытий электродов для сварки меди, используют и другие (12).

Автоматическая сварка под флюсом угольным электродом. Угольный (графитизированный) электрод затачивают в виде плоской лопатки [14]. Сборка под сварку предусматривает закладку встык присадочного металла (латунь или томпак) для раскисления металла шва цинком. Затем засыпают флюс ОСЦ-45. Сварку выполняют постоянным током обратной полярности. Предварительный подогрев осуществляют замыканием электрода на изделие. Режим сварки приведен в табл. 20.

20. Режимы[1] сварки меди под флюсом угольным электродом

Толщина свариваемого металла в *мм*	Размер присадочного металла в *мм*		Время подогрева в *сек*	Скорость сварки в *м/ч*
	Толщина	Ширина		
5	5	12	3—5	20
6	6	12	3—5	18
8	8	12	5—7	12
10	10	14	10—15	6—8

[1] Напряжение дуги 19—21 *в*, ток 1000 *а*.

Металл шва получается раскисленным, содержит сравнительно мало примесей, структура его крупнокристаллическая со стыком дендритов по оси шва. Характер кристаллизации меняют при помощи подкладок. Наилучшие результаты получены на графитовой подкладке.

Механические свойства металла шва при толщине свариваемой меди марки М1 5 *мм*: $\sigma_в = 18{,}0 \div 18{,}6$ $кГ/мм^2$; $\delta = 25 \div 33\%$. Возможно дополнительное упрочнение шва обкаткой роликами.

Данный способ сварки требует тщательной сборки под сварку, частой смены и заточки электродов.

Сварка под плавленными флюсами плавящимся электродом. Сварочные флюсы почти не изменяют состав металла шва. Поэтому его электро- и теплопроводность высокие (табл. 21). Лучшие результаты достигаются при использовании бескислородного флюса АН-М1 (55% фтористого магния; 40% фтористого натрия; 5% фтористого бария).

21. Физические свойства сварных швов на меди

Металл	ρ в *ом·мм²/м*	σ в *м/ом·мм²*	λ в *кал/см·сек·град*
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

В качестве электродного металла для сварки чистой меди используют проволоку М1 или бескислородную медь. Для повышения механических свойств меди и ее технологической прочности применяют легированные проволоки Бр.КМЦ 3-1 и Бр.АЖМц 10-3-1,5, но в этом случае электро- и теплофизические свойства сварного соединения очень низки. Сварку меди под флюсом выполняют

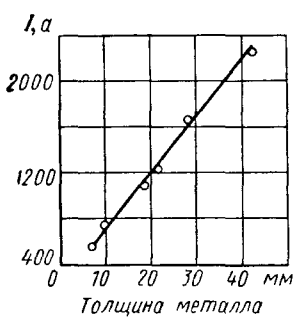


Рис. 12. Зависимость сварочного тока от толщины металла [10]

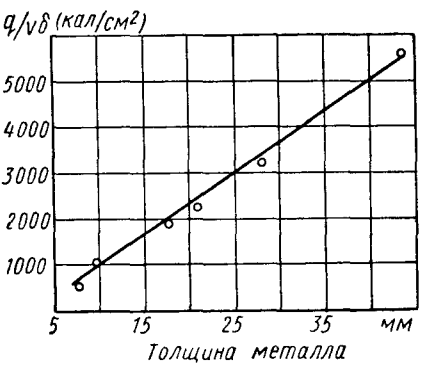


Рис. 13. Минимальные значения удельной погонной энергии $\left(\frac{q}{v\delta}\right)$ сварки меди под флюсом в зависимости от толщины металла [10]

на постоянном токе обратной полярности. Это обеспечивает хорошую стабильность дугового разряда. Коэффициент расплавления электродной проволоки составляет приблизительно 20 *г/а·ч*. Скорость расплавления проволоки из чистой меди и Бр.Х-0,8 не зависит от величины вылета электрода, но для сильно легированных сплавов меди она увеличивается с ростом вылета электрода. Поэтому сварочный ток должен быть снижен.

При сварке меди толщиной более 15 *мм* рекомендуется разделка свариваемых кромок под углом 90° с притуплением или сварка без разделки кромок расщепленным электродом с расположением электродных проволок поперек шва. Сварку производят в жестком закреплении на подкладке (при малой длине швов на подкладке из графита, при большой — на флюсовой подушке). Режимы сварки

меди под слоем флюсов АН-20, АН-26 и АН-М1 можно определить по графикам рис. 12—14.

Ввиду высокой чувствительности меди к окислению и влиянию водорода (поры, трещины) подготовка под сварку должна быть весьма тщательной. Свариваемые кромки и электродный металл зачищают до металлического блеска и обезжиривают. Графит перед сваркой должен быть прокален. Флюс для формирования подушки и сварки также должен быть прокален или просушен в сушильной печи непосредственно перед сваркой при 300—400°С. При большой длине шва соединение рекомендуется собирать на прихватках, поставленных автоматом с выключенным механизмом перемещения. Шаг прихваток 300—400 *мм*. Начало и конец шва следует выводить на технологические пластинки из меди, приваренные к металлу изделия для создания предварительного подогрева и стационарного теплового режима сварки. Можно использовать приставные графитовые планки, толщина которых должна соответствовать толщине свариваемого металла.

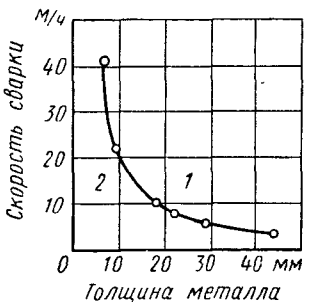


Рис. 14. Максимально возможная скорость сварки меди в зависимости от толщины металла при коэффициенте формы 1,8—2,0 [10]: *1* — есть шлаковые включения; *2* — нет включений

Тщательное соблюдение технологии позволяет получать хорошее качество изделий на металле с толщиной до 40 *мм*, при сварке за один проход без разделки кромок.

По аналогичной технологии можно получить сварное соединение меди со сталью. В этом случае электрод смещают на медь. Режим выбирают такой, чтобы жидкая медь в сварочной ванне контактировала бы со сталью возможно короткое время во избежание получения хрупких прослоек.

Для сварки латуни марок Л62 и ЛО62-1 применяют медную проволоку с использованием плавленого флюса МАТИ-5 или АНФ-5. Флюс МАТИ-53 изготовляют переплавлением шихты, состоящей из 77% флюса ОСЦ-45, 7,6% борной кислоты и 15,4% кальцинированной соды.

Сварка под керамическими флюсами плавящимся электродом. Керамический флюс К-13 МВТУ (табл. 22) применяют при сварке меди со сталями и для наплавки меди на сталь. В состав флюса входят компоненты (в %): глинозем 20, плавиковый шпат 20, кварцевый песок 8—10, магнезит 15, мел 15, бура безводная 19—15, порошок алюминия 3—5. Шихту замешивают на жидком стекле, гранулируют и после сушки прокаливают в течение 1—2 *ч* при 450°С.

22. Режимы сварки под флюсом К-13 МВТУ (проволока марки М1)

Толщина металла в *мм*	Диаметр проволоки в *мм*	Напряжение в *в*	Ток в *а*	Скорость сварки в *м/ч*	Формирующая подкладка
1—2	1—2	26—27	160—180	21	Медь (охлаждаемая), графит
5—6	2—3	28—30	400—500	21	

Примечание. Ток постоянный, полярность обратная.

В зависимости от свариваемого сплава в состав керамического флюса вводят легирующие компоненты (хром, никель и др.), если сварку ведут проволокой М1, а не проволокой из свариваемого металла. Флюс К-13 МВТУ позволяет получить хорошо раскисленный металл, причем алюминий практически не пере-

ходит в металл шва (следы). Шлак легко отделяется от сварного шва, формирование шва хорошее. Электро- и теплопроводность металла шва такие же, как и основного металла.

Применение керамического флюса К-13 дает возможность ввести в сварочную ванну модификаторы, позволяющие регулировать процессы кристаллизации и физические свойства наплавленного металла.

Сварку производят в жестком закреплении. Свариваемые кромки и электродную проволоку зачищают и обезжиривают. Флюс перед сваркой прокаливают 40 *мин* при 450°С 24.

Для сварки меди может применяться керамический флюс ЖМ-1. Металл шва не отличается по составу от исходного. Флюс хорошо стабилизирует дугу. Поэтому сварку можно производить на переменном токе. В состав флюса ЖМ-1 входят (в %): мрамор 28,0; полевой шпат 57,6; плавиковый шпат 8,0; древесный уголь 2,2; борный шлак 3,5; алюминий 0,8.

Электрошлаковая сварка. Сварку меди толщиной 30—55 *мм* можно осуществлять электрошлаковым процессом с пластинчатым электродом [11]. Разработаны опытные флюсы из фторидов щелочно-земельных металлов с температурой плавления ниже температуры плавления меди. Механические свойства металла шва мало отличаются от свойств основного металла (табл. 23).

23. Механические свойства металла шва при электрошлаковой сварке меди марки М2

Металл	$\sigma_в$ в *кГ/мм²*	δ в %	$a_н$ в *кГм/см²*
Основной	20,4—22,2	46,1—60,4	16,8—17,1
Сварной шов	20,1—19,4	47,5—46,3	15,9—16,1

Сварка в защитных газах. Автоматическая, полуавтоматическая и ручная сварка меди в среде защитных газов может производиться плавящимся и вольфрамовым электродом. Наиболее часто применяется аргоно-дуговая сварка вольфрамовым электродом (толщины до 3 *мм*), реже — сварка плавящимся электродом [25].

Защитные газы (аргон, гелий и азот, который с медью не дает устойчивых соединений) должны быть высокой степени чистоты, так как медь очень чувствительна к окислению и к водороду. Сварка меди в среде азота дает удовлетворительные результаты по физическим свойствам шва для электротехнических целей [18]. Хорошие результаты при сварке изделий из меди толщиной 4,5—15 *мм* получаются при полуавтоматической сварке в азоте высокой чистоты с присадочной проволокой МНЖКТ-5-1-0,2-0,2.

Присадочный и основной металл перед сваркой зачищают до металлического блеска и обезжиривают. Медь толщиной до 5—6 *мм* сваривают без разделки кромок: для получения вакуумно-плотных швов выполняют разделку типа «вакуумный замок». При сварке используют подкладку из предварительно прокаленного графита или медных пластин, охлаждаемых водой. В последнем случае следует обращать внимание на процесс охлаждения, так как при чрезмерном охлаждении может появиться на поверхности конденсированная влага из атмосферы, что, как правило, приводит к появлению пористости и трещин. Сварку изделий большой протяженности ведут по прихваткам, поставленным с шагом 300—400 *мм*.

Расход защитного газа зависит от его плотности и теплофизических свойств и составляет: аргона 8—10 *л/мин*, гелия 10—20 *л/мин* и более, азота, по данным работников завода им. Посенко, 15—20 *л/мин*.

Электродуговую сварку латуней и других сплавов меди, содержащих цинк, рекомендуется вести с низкоопущенным соплом (МАТИ).

При сварке меди большой толщины следует использовать присадочный металл, легированный раскислителями (Si; P; Al).

Рекомендуемые сочетания основного и электродного или присадочного металла приведены в табл. 24.

24. Рекомендуемые присадочные металлы

Основной металл	Присадочный металл или электродная проволока
Медь	Медь или меднокремнистый сплав
Медь — цинк (латуни)	Меднокремнистый сплав
Медь — олово (бронзы)	То же
Медь — алюминий (бронзы)	Медноалюминиевый сплав

Сварку вольфрамовым электродом ведут на постоянном токе прямой полярности в нижнем положении, а плавящимся электродом — на токе обратной полярности. Режимы сварки меди и медных сплавов различны. Для сварки меди требуются более повышенные значения сварочного тока, чем для сварки ее сплавов, ввиду значительно большей ее теплопроводности.

СВАРКА СЕРЕБРА И БИМЕТАЛЛА СТАЛЬ-СЕРЕБРО

В зависимости от назначения и условий эксплуатации для сварных конструкций применяют серебро различной чистоты или специальные сплавы (табл. 25 и 26). Серебро указанных марок выпускается в виде проволоки, листов, полос, и труб. Оно может использоваться в двухслойных металлах в качестве защитного, плакирующего слоя, толщина которого обычно не превышает 1,0—2 *мм*.

25. Химический состав серебра и его сплавов

Марка серебра	Химический состав в %							
	Ag	Ni	Si	Примеси, не более				Всего примесей
				Pb	Fe	Sb	Bi	
Ср. 999,9	99.99	—	—	—	—	—	—	0.01
Ср. 999	99.9	—	—	0.003	0.05	0.002	0,002	0.1
99.99	99.99	—	—	—	—	—	—	—
99.96	99.96	—	—	—	—	—	—	—
99.9	99.9	—	—	0.333	0,05	0,002	0.002	0.1
Мелкозернистое серебро	Ост.	0.15	—	—	—	—	—	—
Твердое серебро КТ12	»	—	1,5	—	—	—	—	—
Твердое серебро	»	—	3,0	—	—	—	—	—

Сварку серебра затрудняют следующие его свойства:

большая теплопроводность, из-за чего требуется применение концентрированных источников тепла и подогрев до 500—600° С.

высокий коэффициент теплового расширения, что вызывает значительные напряжения и деформации конструкций;

высокая растворимость кислорода в жидком серебре и резкий перепад растворимости при температуре кристаллизации (табл. 27). В конце процесса затвердения кислород, выделяясь из раствора под некоторым давлением, увлекает остатки жидкого металла из промежутков между твердыми дендритами [17].

26. Механические свойства серебра и его сплавов

Показатель	Марка серебра							
	Чистое серебро		FK-Silber		KT-12		Optasil	
	недеформированное	деформированное[1]	недеформированное	деформированное[1]	недеформированное	деформированное[1]	недеформированное	деформированное[1]
Твердость по Бринелю:								
при 20° С	26—28	85	35—40	89	55—60	107	63—68	112
» 300° С	15	—	26	—	32	—	49	—
» 195° С	41	—	57	—	60	—	—	—
Предел прочности при растяжении в *кГ/мм²*:								
при 20° С	13	28	18	32	24	35	26	38
» 270° С	11	—	13	—	15	—	17	—
» 195° С	22	—	30	—	34	—	—	—
Относительное удлинение в %:								
при 20° С	60	4	50—60	4	22—25	2.5	30—32	1,5
» 270° С	34	—	32	—	28	—	25	—
» 145° С	47	—	70	—	46	—	—	—

[1] Деформация 55%.

Окисел серебра Ag_2O обладает высокой упругостью диссоциации и разлагается при 190°С по реакции

$$Ag_2O \rightleftarrows 2Ag + \frac{1}{2} O_2.$$

При температуре 25°С серебро не вступает в реакцию с кислородом при давлении его ниже 0,1 *мм рт. ст.* [15]. Однако при давлении кислорода, достаточном

27. Растворимость кислорода в серебре

Температура в °С	Количество объемов кислорода, растворенного в единице объема серебра	Температура в °С	Количество объемов кислорода, растворенного в единице объема серебра
200	0.142	800	0.354
400	0.087	973	20.28
600	0.132	1125	17.56

для подавления диссоциации Ag_2O, возможно существование эвтектики Ag_2O—Ag с температурой плавления 507°С [26]. В условиях, когда окисел серебра нестабилен, серебро способно к адсорбции свободного кислорода. Стойкость адсорбированного слоя, даже при высоких температурах, объясняется резким различием между теплотой образования окисла и теплотой адсорбции. По некоторым данным процесс адсорбции, будучи распространенным на межкристаллитные поверхности, может служить причиной хрупкости металла без образования новой фазы [15];

склонность к внутреннему окислению сплавов серебра, содержащих металлы-добавки, например, алюминий, медь, кремний, кадмий и др., свободная

энергия образования окислов которых оказывает более отрицательное влияние, чем окисла серебра. Окисление металла-добавки происходит при давлении кислорода, которое заключено между величинами упругости диссоциации окислов серебра и металла-добавки. Внутреннее окисление повышает твердость и прочность серебра и резко снижает относительное удлинение и предел усталости.

Растворимость водорода в твердом серебре (данных о растворимости в жидком серебре не имеется) — незначительна. Гидрид серебра AgH красно-коричневого цвета с плотностью 5,3 $г/см^3$ полностью разлагается при температуре 773,15° К. Азот не растворим ни в жидком, ни в твердом серебре [3]. Нитрид серебра эндотермичен и распадается при нормальных температурах.

Сварка серебра может производиться как методом плавления, так и путем высокотемпературной пластической деформации (кузнечная сварка).

При газовой сварке применяют метано-кислородное и ацетилено-кислородное нормальное пламя. Мощность пламени выбирается из расчета 100—150 $л/ч$ горючего газа на 1 $мм$ толщины свариваемого изделия. Рекомендуется присадочная проволока, раскисленная алюминием (0,5—1,0%) и флюс, приготовленный на этиловом спирте, из равных количеств буры и борной кислоты с добавкой 10% по весу стандартного флюса для газовой сварки алюминия, что способствует офлюсованию окислов алюминия, образующихся в процессе сварки. Флюс наносят на свариваемые кромки или на присадочный пруток.

Процесс сварки необходимо вести «левым способом», выдерживая расстояние ядра пламени от поверхности сварочной ванны 3—4 $мм$. Горелку располагают под прямым углом или слегка наклонно к свариваемой поверхности. Нагрев производят быстро, без перерывов и повторений; вместо прихваток желательно применять сборочные приспособления и кондукторы. Свариваемые кромки и присадочную проволоку расплавляют одновременно, проволоку нагревают до более высокой температуры. Горелку не рекомендуется отводить от жидкого металла до полного его затвердевания. Механические свойства соединений, выполненных ацетилено-кислородным пламенем, нестабильны и составляют: предел прочности при растяжении 10—13 $кГ/мм^2$, угол загиба 30—180°.

Сварку вольфрамовым электродом в аргоне осуществляют преимущественно на постоянном токе прямой полярности, но возможна также сварка и на переменном токе. В последнем случае сварные швы имеют более мелкозернистую структуру, внешний вид швов ухудшается и возрастают потери серебра на угар и разбрызгивание. Ручную сварку ведут справа налево углом вперед без поперечных колебаний. Угол наклона горелки к плоскости свариваемых деталей 60—70°, присадочную проволоку подают под углом 90° к вольфрамовому электроду; выводить присадочный пруток из зоны защитного газа не рекомендуется во избежание насыщения его торца газами. Для обеспечения качественных швов рекомендуется применять аргон марки А по ГОСТу 10157—62, причем каждый баллон должен дополнительно контролироваться на содержание влаги.

Сопла горелок изготовляют из керамики или нержавеющей стали; медь непригодна, так как образует с серебром, которое напыляется на сопло в процессе сварки, легкоплавкую эвтектику. Для сварки серебра используют серийные установки, предназначенные для сварки титана и алюминия, оборудованные устройствами дистанционного включения тока и подачи газа после прекращения горения сварочной дуги.

Из-за жидкотекучести и подвижности расплава серебра, его сварку необходимо выполнять в нижнем или слегка наклонном положениях. По мере нагрева металла в процессе сварки на весу рекомендуется снижать сварочный ток на величину, обеспечивающую отсутствие протеков и прожогов. Отличное формирование швов обеспечивается применением формирующих подкладок и поддувом инертного газа. Особенно целесообразно применять эти меры при автоматической сварке встык. Режимы сварки приведены в табл. 28. Сварные соединения имеют предел прочности при растяжении 14—15 $кГ/см^2$ и угол загиба 180°.

28. Ориентировочные режимы аргоно-дуговой сварки серебра вольфрамовым электродом

Толщина свариваемых листов в мм	Условия сварки	Диаметр вольфрамового электрода в мм при токе		Сварочный ток в а		Диаметр присадочной проволоки в мм	Расход аргона в *л/мин*
		постоянном	переменном	постоянный	переменный		
1,0	Встык с отбортовкой кромок	2,0	—	60—70	—	—	3—4
2,0	Встык без зазора, на весу	2,0	3,0	120—130	140—150	2—3	4—5
3,0	То же	3,0	4,0	150—160	180—200	3	6—7

Примечание. Средняя скорость сварки 4—5 *м/ч*.

Для химических аппаратов, работающих в агрессивных средах при повышенных температурах и давлениях, применяют металлические листы «низкоуглеродистая сталь-серебро», полученные методом непосредственного плакирования серебра или плакированием через промежуточный слой меди и сплавов на ее основе с никелем и серебром. Наиболее сложной и ответственной технологической операцией является выполнение шва плакирующего слоя стыкового соединения биметалла, сочетающего в себе как наплавку серебра на сталь, так и сварку серебра плакирующих слоев.

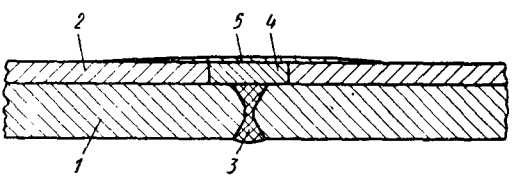


Рис. 15. Сварное стыковое соединение биметалла сталь-серебро: *1* — слой из углеродистой стали; *2* — серебряный плакирующий слой; *3* — шов из углеродистой стали; *4* — серебряная наплавка; *5* — серебряная полоса, приваренная кузнечной сваркой

Серебро и железо не растворимы ни в жидком, ни в твердом состояниях, не образуют эвтектик и интерметаллидных фаз [26]. Наплавка серебра на сталь возможна через промежуточный слой (медь, монель-металл, никель), который предварительно наносят на сталь гальванически, напылением или наплавкой. Однако серебро, наплавленное на промежуточный слой, недостаточно стойко против коррозии и имеет низкую пластичность из-за легирования никелем (до 0,12—0,24%) и медью (до 0,35—0,8%). Расплав серебра удовлетворительно смачивает сталь, поверхность которой очищена от окислов и адсорбированных газов, в водороде, в вакууме или в присутствии флюсов, растворяющих окислы и содержащих поверхностно активные вещества.

Серебро на сталь наплавляют атомноводородной сваркой, используя серебряную присадку. Однако полное соответствие свойств серебра сварного соединения и плакирующего слоя, в частности по чистоте и плотности серебра, достигается после облицовки шва серебряной лентой толщиной 0,3—1,0 *мм*, которую приваривают методом давления при температуре 700—800°С (рис. 15).

ЛИТЕРАТУРА

1. Акулов А. И., Сокол И. А. Сварка трубопроводов из цветных металлов. М., Госстройиздат, 1962.

2. Ассиновская Г. А., Зеликовская Н. М. Газовая сварка латуни и наплавка на сталь. М., «Машиностроение», 1960.

3. Гельман А. С. Технология и оборудование контактной электросварки. М., Машгиз, 1960.
4. Герасимов Я. И. и др. Химическая термодинамика в цветной металлургии. Т. II. М., Металлургиздат, 1961.
5. Евсеев Г. Б., Глизманенко Д. Л. Газовая сварка и резка металлов. М., Машгиз, 1954.
6. Зайчик Л. В., Орлов Б. Д. и Чулошников П. Л. Контактная электросварка легких сплавов. М., Машгиз, 1963.
7. Кабанов Н. С. и Слепак Э. Ш. Технология стыковой контактной сварки. М., Машгиз, 1961.
8. Клячкин Я. Л. Сварка цветных металлов. М. «Машиностроение», 1964.
9. Корнилов И. И. и др. Металлохимические свойства элементов периодической системы. М. «Наука», 1956.
10. Кореняк Ю. М. Сварка меди под флюсом. М., «Машиностроение», 1967.
11. Лычко И. И., Илющенко В. М., Алексеев А. П. Электрошлаковая сварка толстолистовой меди. «Автоматическая сварка», 1967, № 10.
12. Мальмстрем А. П. Электрическая дуговая сварка меди. М., Машгиз, 1954.
13. Материалы в машиностроении. Т. I. М., «Машиностроение», 1967.
14. Ольшанский П. А. Автоматическая сварка меди под флюсом. «Автогенное дело», 1950, № 11.
15. Окисление металлов. Т. I. Теоретические основы. Под ред. Ж. Бенара. М., «Металлургия», 1968.
16. Подгаецкий В. В. Сварка под флюсом меди и ее сплавов металлическим электродом. «Автоматическая сварка», 1953, № 5.
17. Райнз Ф. Диаграмма фазового равновесия в металлургии. М., Металлургиздат, 1960.
18. Райский Е. Е., Мальченко В. М. Использование азота высокой чистоты для газоэлектрической сварки и резки меди. «Автоматическая сварка», 1967, № 9.
19. Самсонов Г. В. Физико-химические свойства элементов. Киев, «Наукова думка», 1965.
20. Смирягин А. П. Промышленные цветные металлы и сплавы. М., Металлургиздат, 1956.
21. Сварочное оборудование. Каталог справочника. Изд. ВНИИЭМ, I.1964.
22. Справочник по сварке. Т. 2. М., Машгиз. 1961.
23. Фродов В. В. Поведение водорода при сварке плавлением. М., «Машиностроение». 1966.
24. Фродов В. В., Арутюнова И. А. Автоматическая сварка и наплавка меди и ее сплавов под керамическим флюсом. Сб. «Сварка цветных металлов», МДНТП, 1961.
25. Федотов Л. Е. Сварка меди. ЛДНТП, 1964.
26. Хансен М., Андерко К. Структура двойных сплавов. Т.I. М., Металлургиздат, 1962.
27. Despic A. R. Joining of Silverplated Steel by heating under pressure. «Journae of Iron and Steel Institute», 1965, Yanuary.
28. Althaus B. Unterscheidenen Sielbesorten. Metal, H. 7. 1963.
29. «Welding Journal», 1962, vol. 41, No 4 pp. 327—330. pp. 331—336.
30. «Welding Journal», 1963, vol. 42, No 1, pp. 29—36.
31. «Missiles anel Rockets» 1959, wol. 5, No 37, pp. 22—32.
32. «Welding Journal», 1962, No 6.
33. «Welding Journal», 1963, vol. 42, No 4, pp. 186—189.
34. Уайт Д. и Бери Д. Бериллий пп. 1960.

ГЛАВА XII

СВАРКА ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ И ИХ СПЛАВОВ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

К тугоплавким металлам, используемым в сварных конструкциях, относятся: титан, цирконий, ванадий, ниобий, тантал, хром, молибден, вольфрам и др.

Сведения о свойствах тугоплавких металлов и соединений приведены в справочниках [50, 51], а также в монографиях [1, 2, 5, 22. 33,39, 40, 42]. Некоторые физико-механические свойства даны в табл. 1.

Тугоплавкие металлы обладают рядом общих химико-металлургических и технологических свойств, основными из которых являются:

1) высокая химическая активность по отношению к атмосферным газам как в расплавленном состоянии, так и в твердом при повышенных температурах;

2) высокая чувствительность к теплофизическому воздействию сварочного процесса;

3) склонность к порообразованию;

4) склонность к образованию трещин.

Эти свойства в основном определяются высокой чувствительностью тугоплавких металлов к элементам внедрения (рис. 1), которые влияют на большинство технологических характеристик: деформируемость в холодном и горячем состоянии, обрабатываемость резанием и особенно на свариваемость. Взаимодействие тугоплавких металлов с газами происходит путем адсорбции и хемосорбции газа, растворения и диффузии газа в металле, образования продуктов взаимодействия (окислов, нитридов и гидридов), резко охрупчивающих металл. Закономерности окисления тугоплавких металлов — изменение скорости окисления в зависимости от времени, фазовый состав и структура образующихся на их поверхности окисных пленок, а также развитие процессов насыщения поверхностных слоев металла кислородом определяются главным образом температурой (табл. 2). Логарифмические и параболические закономерности характеризуют окисление с замедляющейся скоростью и образованием защитных

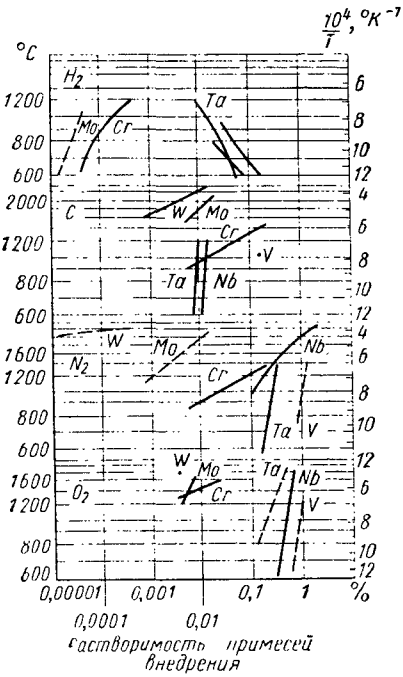


Рис. 1. Растворимость примесей внедрения в тугоплавких металлах [79]

1. Физико-механические свойства тугоплавких металлов [51, 66]

Свойства	IVa группа			Va группа			VIa группа			VIIa группа
	Титан	Цирконий	Гафний	Ванадий	Ниобий	Тантал	Хром	Молибден	Вольфрам	Рений
Атомный номер	22	40	72	23	41	73	24	42	74	75
Атомный вес	47,9	91,2	178,5	50,9	92,9	180,9	52,0	95,9	183,9	186,2
Ближайшее межатомное расстояние, KX	α·2,896 β·2,864	α·3,17 β·3,13	α·3,127 β·3,031	2,62	2,86	2,85	2,498	2,72	2,74	2,74
Температура в °С: плавления	1668	1845 ± 10	2222	1919 ± 2	2468	2996	1903	~ 2610	3380	3180 ± 20
кипения	3260	~ 3580	5400	3400	4927	5425	2200	~ 5560	5900	5630
Коэффициент термического линейного расширения в $°C^{-1} \cdot 10^6$ (0—100° С)	9,95	5,5	5,8	8,3	7,1	6,6	7,5	5,2	4,4	6,6
Теплопроводность в *кал/см·сек·град*	0,041	0,04	0,053	0,074	0,125	0,130	0,212	0,328	0,4	0,17
Теплоемкость при 20° С в *кал/моль·град*	6,23	6,7	6,24	6,1	5,52	6,15	5,72	5,75	5,9	6,1
Скрытая теплота плавления в *ккал/моль*	5	5,5	—	4	6,4	5,9	3,4	6,7	11,2	7,9
Скрытая теплота испарения в *ккал/моль*	112,5	142,15 ± 0,35	—	106	166,5	183,9	76,6	117,4	340	152
Удельное электросопротивление при 20° С в *ом·см*	55	39,6—39,8	37	24,8	17,1	13,5	12,8	5,2	5,5	17,5
Сечение захвата поглощения тепловых нейтронов в *барн*	6,1	0,18	10	4,9	1,1	2,1	3,1	2,6	19	85
Плотность в *г/см³*	4,54	6,5	13,29	6,11	8,57	16,6	7,2	10,2	19,3	21,0
Модуль упругости · 10^{-3} в *кГ/мм²*	9,9 - 10,9	11	14	13,52	8,9 - 11	18,9	28,5	33,4	41,3	46,5 - 47,5
Предел прочности * в *кГ/мм²*	26,7—33,7	48	41—46	38	24,5—35	35—52	30—35	59—90	105—147	105—119
Предел текучести в *кГ/мм²*	14,0—16,9	—	24—32	29	—	—	18—20	—	—	—
Относительное удлинение в %	40—55	33	26—30	32—38	30—50	30—50	5—25	5—15	1—4	10—25
Напряжение, вызывающее 1% деформации за 24 *ч* при 1000 С°, в *кГ/мм²*	—	—	—	—	2,0	2,1—2,8	1,4	2,1—2,8	4,2	—

* Mo и W — после отжига для снятия напряжений. Остальные металлы в состоянии после рекристаллизационного отжига.

2. Температура реакции газов и закономерности окисления тугоплавких металлов

Группа	Металл	Температура реакции газа в °С					Температура в °С при закономерности окисления		
		H_2	O_2	N_2	Образование карбидов, боридов, силицидов	H_2O	логарифмической	параболической	линейной
IV	Титан	<275	>250 400	>550	—	>500	<200	200—600	>600
	Цирконий	>300	>250	>600	>1000	>200—250	<200	200—900	>900
	Гафний	—	>350	—	—	—	—	350—800	>800
V	Ванадий	>200	>300	>800	>1000	—	—	<600	>600
	Ниобий	>200	>500	>600	>800	—	<150	150—375	>375
	Тантал	<700	>750	>900	>1200	<700	<300	300—500	>500
VI	Хром	-	>1200	>800	>800—1000	—	<400	400—1100	>1100
	Молибден	Инертен	>400	Инертен	>1100	—	—	<600	>600
	Вольфрам	То же	>400	То же	>1000—1200	—	—	<800—1000	>1000
VII	Рений	»	>350	»	Инертен	—	—	<300	>300

пленок. Линейная закономерность характерна для окисления, протекающего с постоянной скоростью, приводящей к насыщению металла кислородом и охрупчиванию. Главным технологическим требованием при сварке тугоплавких металлов является изоляция от атмосферы расплавленного металла и зоны, нагреваемой в процессе сварки до температур начала реакции металла с газами. С этой целью сварку плавлением всех тугоплавких металлов выполняют в атмосфере инертного газа или в вакууме при давлении не выше $3 \cdot 10^{-4}$ *мм рт. ст.* В качестве защитных газов используют аргон марки А ($\leqslant$0,003% O_2, $\leqslant$0,01% N_2 по ГОСТу 10157—62) или гелий высокой чистоты (ВЧ МРТУ 51-04-65). Инертные газы недостаточной чистоты предварительно очищают от влаги, пропуская через силикагель марки КСМ и ШСМ (ГОСТ 3956—54*) и алюмогель (ТУ ГХП-53), а от кислорода — через нагретую до 900—1000°С титановую стружку или губку. Наряду с защитой необходима также тщательная подготовка деталей под сварку. Свариваемые кромки обрабатывают механическим путем. Не допускаются расслоения, заусенцы и другие дефекты. Кромки тщательно обезжиривают. Для удаления поверхностных окислов производится травление в специальных реактивах [41, 50, 51]. После травления детали тщательно промывают и сушат. Наряду с металлом необходимо очищать и обезжиривать сварочные приспособления и инструменты.

Чувствительность тугоплавких металлов и их сплавов к термическому циклу сварки, склонность к поро- и трещинообразованию зависит от композиции сплава, содержания примесей в исходном материале, качества подготовки под сварку, качества защиты и технологических режимов сварки.

Для соединения тугоплавких металлов преимущественно применяют методы сварки плавлением: дуговую в инертных газах (в камерах и со струйной защитой), под флюсом (для титана), в вакууме электронолучевую, лазером. Для некоторых изделий перспективны методы сварки без расплавления: диффузионная в вакууме и защитных газах, а также взрывом, трением, холодная сварка давлением, химическим осаждением металла из газовой фазы ниже температуры рекристаллизации свариваемых металлов.

По свариваемости, технике и технологии сварки тугоплавкие металлы можно разделить на две группы: к первой группе относятся титан, цирконий, гафний, ванадий, ниобий, тантал; ко второй — хром, молибден, вольфрам. Металлы первой группы при соблюдении технологических условий сварки обладают хорошей свариваемостью. Сварка металлов второй группы представляет

значительные трудности в связи с малой деформационной способностью основного металла, повышенной чувствительностью к элементам внедрения и теплофизическому воздействию процесса сварки, вызывающих хрупкость сварных соединений. Чрезвычайно низкая растворимость в этих металлах элементов внедрения (например, для молибдена 0,0002% O_2; 0,003% C; 0,0008% N_2), являющихся неизбежными примесями, обусловленными технологией производства, приводит к выпадению окислов, нитридов, карбидов, боридов, образующих с металлом эвтектики. Эти соединения, располагаясь по границам зерен, являются в условиях напряженного состояния причиной образования кристаллизационных трещин. Процессу образования трещин способствует охрупчивание металла в связи с образованием крупнозернистой структуры при тепловом воздействии сварки.

Основными путями получения пластичных сварных соединений, стойких против образования трещин, являются:

1) высокое качество исходных материалов (основного и присадочного металла, защитных материалов);

2) применение техники и технологии сварки, гарантирующих ненасыщение примесями;

3) применение специальных присадочных материалов, улучшающих пластичность сварного соединения;

4) улучшение напряженного состояния в сварных соединениях;

5) рациональное конструирование сварных узлов, направленное на избежание жесткой схемы напряженного состояния. Наиболее рациональными являются стыковые продольные швы.

6) Применение специальных технологических приемов; для металлов второй группы подогрев в процессе сварки (для молибдена $\geqslant 200-315^\circ$ С, для вольфрама $\geqslant 340^\circ$ С), снятие остаточных напряжений после сварки (для молибдена при температуре 980° С, в течение 1 *ч*, для вольфрама 1230° С 1—2 *ч*).

Металлы первой группы (титан, цирконий и др.) обладают хорошей стойкостью против горячих кристаллизационных трещин, но склонны к задержанному разрушению и образованию холодных трещин. Склонность металлов первой группы к трещинообразованию связана в первую очередь с водородом, охрупчивающим металл вследствие гидридного превращения при содержании его выше предельной растворимости, и внутреннего адсорбционного эффекта. Склонность к растрескиванию обусловливается также охрупчиванием вследствие насыщения элементами внедрения (O_2, N_2, C) и теплофизического воздействия сварки, вызывающего перегрев, укрупнение зерна и выпадение хрупких фаз. Характерные особенности техники и технологии сварки металлов первой группы подробно рассмотрены на примере титана, который из всех тугоплавких металлов наиболее широко применяется в промышленности.

ТИТАН И ЕГО СПЛАВЫ

Основные свойства и особенности сварки

[2, 4, 7, 22, 25, 40, 45, 51, 59, 68]

У титана имеются две аллотропические модификации: высокотемпературная β-Ti с объемноцентрированной кубической решеткой и низкотемпературная α-Ti с плотноупакованной гексагональной. Температура полиморфного превращения титана $\alpha \rightleftarrows \beta$ в равновесных условиях равна приблизительно 882° С.

Марки основных титановых сплавов, применяемых в сварных конструкциях и получивших наибольшее распространение в СССР, приведены в литературе [7, 51].

В зависимости от фазового состояния при комнатной температуре сплавы титана можно условно разделить на три группы: α-, (α + β)- и β-сплавы.

К сплавам с α-структурой относятся технический титан ВТ1 и сплавы ВТ5 (5% Al) и ВТ5-1 (5% Al, 2,5% Sn). Отличительной особенностью этих сплавов является высокая термическая стабильность, т. е. отсутствие охрупчивания при длительном совместном воздействии температур и напряжений, хорошая свариваемость. Недостатки: более низкая по сравнению с α + β- и β-сплавами технологическая пластичность и отсутствие способности к упрочняющей термической обработке.

К группе (α + β)-сплавов относятся:

сплавы мартенситного типа, где β-фаза существует только при повышенных температурах. Сплавы этого типа ОТ4-1 (2% Al, 1,5% Mn), ОТ4 (3% Al, 1,5% Mn), ОТ4-2 (6,5% Al, 1,5% Mn) содержат Al как преобладающую легирующую до-

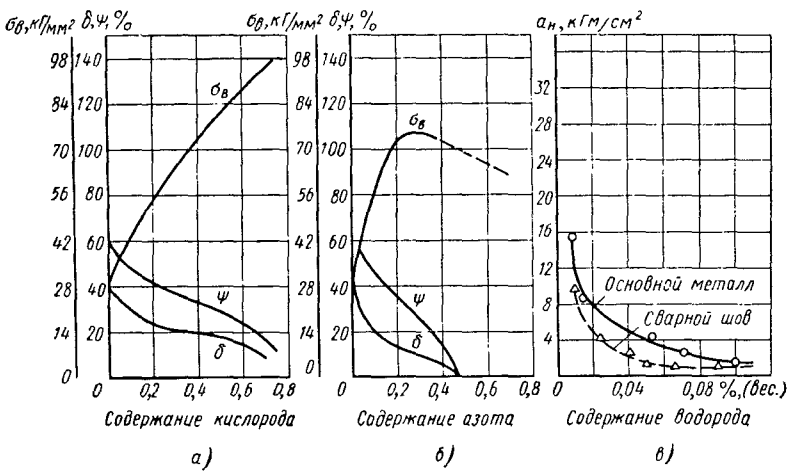


Рис. 2. Влияние содержания кислорода (*а*), азота (*б*) и водорода (*в*) на механические свойства титана [40, 49]

бавку и небольшое количество β-стабилизатора (< 2%). Эти сплавы сохраняют преимущество сплавов с α-фазой, но более технологичны при уже сравнительно невысоких температурах вследствие появления пластичной β-фазы. Основной недостаток — отсутствие способности к упрочняющей обработке;

двухфазные сплавы, где β-фаза может в определенных количествах сохраняться при комнатных температурах: ВТ6 С (4,5% Al, 3,0 V), ВТ6 (6% Al, 4% V), ВТ14 (4% Al, 3% Mo, 1% V). Двухфазные сплавы имеют более высокие прочностные свойства, но обладают худшей свариваемостью, чем сплавы мартенситного типа или сплавы с α-фазой. Двухфазные сплавы могут упрочняться закалкой и старением.

К группе β-сплавов относятся титановые сплавы, легированные β-стабилизаторами в такой степени, что после закалки и даже отжига они состоят из β-фазы (ВТ15 — 3% Al, 8% Mo, 11% Cr). Сплавы с β-структурой имеют большие перспективы развития, так как сочетают хорошую технологическую пластичность с высокой прочностью и хорошей свариваемостью, однако при определенных неблагоприятных термических циклах нагрева и последующего охлаждения, особенно в интервале субкритических температур, возможно охрупчивание. Помимо рассмотренных, разработаны серийные и опытные титановые сплавы со специальными свойствами: жаропрочные сплавы шестикомпонентной системы Ti — Al — Cr — Fe — Si — B серии АТ (АТ3, АТ4, АТ6, АТ8 и др.); сплавы серий 48-Т, ИРМ, ИМП и др.

Трудности сварки титана и его сплавов вызываются в основном (табл. 3): поглощением расплавленным или нагретым металлом газов, их диффузией в зону сварки из основного металла, повышенным содержанием газов в основном или присадочном металле, а также структурными превращениями в металле шва и околошовной зоны. Повышенная газонасыщенность металла резко снижает его пластичность (рис. 2) и конструктивную прочность, а тепловое воздействие сварки вызывает неоднородности свойств сварного соединения (рис. 3).

Основными методами, обеспечивающими получение сварных соединений с требуемыми свойствами, являются предупреждение насыщения металла шва и околошовной зоны газами и загрязнения их примесями, а также регулирование структурных изменений выбором необходимого термического цикла.

Вследствие низкой теплопроводности и малой объемной теплоемкости титана области, нагретые при сварке до высокой температуры, имеют значительно большие размеры, чем у стали и особенно у алюминия и меди [68]. Особенно

3. Основные трудности сварки титана и его сплавов

Основные трудности сварки	Причина	Основные методы решения
Высокая химическая активность по отношению к кислороду, азоту и водороду как в расплавленном состоянии, так и в твердом при повышенных температурах	Активное поглощение газов: кислорода при $\geq 350°$ С, азота при $\geq 550°$ С, водорода при $\geq 250°$ С, которое приводит к резкому снижению пластичности и конструктивной прочности сварных конструкций	Тщательная защита зоны сварки, нагреваемой выше 350° С, от взаимодействия с атмосферой путем сварки в среде инертных газов высокой чистоты, в вакууме, под специальными бескислородными флюсами
Высокая чувствительность к сварочному термическому циклу	Резкий рост зерна высокотемпературной β-фазы; перегрев; образование хрупких фаз при охлаждении и старении ($\beta \rightarrow \alpha'$, α''), ($\beta \rightarrow \alpha' - \gamma$, $\alpha' + \omega + \gamma$ и др.). Снижение пластических свойств, неоднородность свойств в различных зонах сварного соединения	Регулирование термического цикла сварки. Для большинства сплавов целесообразна сварка на минимальных погонных энергиях с высокими скоростями. Термическая обработка (закалка, закалка + старение) для термически упрочняемых сплавов
Склонность к порообразованию	Водородная пористость, вызываемая: а) попаданием водорода в сварочную ванну извне вместе с адсорбированной влагой на свариваемых кромках, присадочной проволоке, флюсе и т. д.; б) перераспределением водорода в результате термодиффузионных процессов. Пористость, вызываемая удержанием пузырьков инертного газа кристаллизующимся металлом сварочной ванны и также углеродом и углеродосодержащими веществами, адсорбированными поверхностью кромок	Применение основного материала и присадочной проволоки с пониженным содержанием водорода. Тщательная подготовка свариваемых материалов под сварку; зачистка кромок, дегазация и зачистка присадочной проволоки; прокалка флюса, соблюдение условий защиты и технологии сварки. Регулирование термического цикла (сварка на высоких скоростях). Применение фтористых флюсов при сварке в инертных газах
Склонность к задержанному разрушению и образованию холодных трещин	Растрескивание вследствие водородного охрупчивания в условиях воздействия растягивающих напряжений первого рода, ускоряемое повышенным содержанием примесей и образованием неблагоприятных структур при охлаждении и старении	Снижение содержания водорода в основном металле до $\leqslant 0{,}010\%$, в присадочной проволоке $\leqslant 0{,}002\%$—$0{,}005\%$. Соблюдение технологии сварки. Предотвращение наводораживания в процессе технологической обработки и при эксплуатации. Снятие остаточных сварочных напряжений

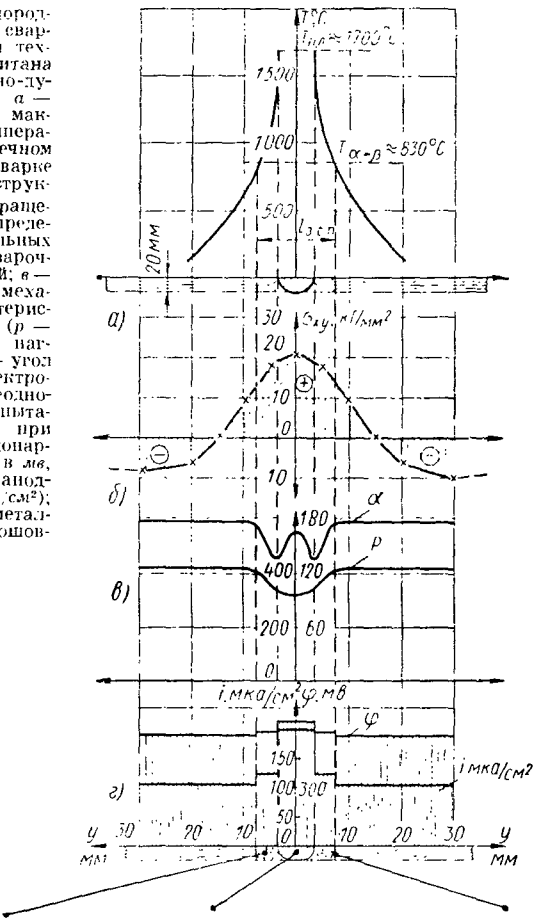


Рис. 3. Неоднородность свойств сварного соединения технического титана ВТ1-1 при аргоно-дуговой сварке: *а* — распределение максимальных температур в поперечном сечении при сварке ($l_{з.с.п}$ — зона структурных превращений); *б* — распределение продольных остаточных сварочных напряжений; *в* — распределение механических характеристик при изгибе (*р* — максимальная нагрузка в *кГ*, α — угол загиба); *г* — электрохимическая неоднородность при испытании в 20% HCl при 20° С (φ — стационарный потенциал в *мв*, *i* — плотность анодного тока в *мка/см²*); *д* — структура металла шва и околошовной зоны



д)

резко увеличивается длина изотерм и, следовательно, продолжительность пребывания металла при высоких температурах. Это вызывает перегрев и резкое увеличение зерен β-фазы и снижение пластичности титана. В техническом титане образуется ряд участков с характерными изменениями структуры и свойств; крупнокристаллический металл шва с игольчатой структурой α′-фазы; околошовная зона с резко возросшим зерном и игольчатой структурой α′-фазы; зона частичной перекристаллизации α-фазы со смешанной структурой α + α′-фазы, за этой зоной следует постепенный переход к неизменной структуре прокатанного основного металла (рис. 3, *д*).

Игольчатая структура α′-фазы, являющаяся закалочной структурой мартенситного типа, снижает пластичность сварных соединений. α′-фаза пред-

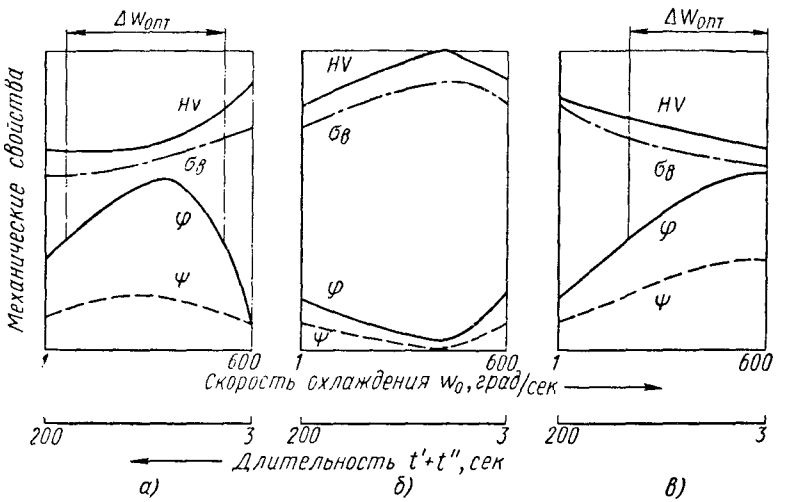


Рис. 4. Влияние длительности $t' \div t''$ пребывания выше температуры $\alpha \rightarrow \beta$-превращения и последующей скорости охлаждения на механические свойства сплавов титана в околошовной зоне [68]:

$\Delta w_{опт}$ — оптимальный интервал скорости охлаждения при сварке; *а* — сплавы со структурой чистой α-фазы или с малым количеством ω- и β-фаз (технический титан ВТ1 и ИМИ1А), α-сплавы с 3,5% Al (ВТ5, ВТ5-1), α + β-сплавы (АТ3—АТ8, ОТ4-1, ОТ4-2, ВТ6С); *б* — сплавы со структурой α + ω + β-фаз при малом и среднем количестве β-фазы [α + β-сплавы ВТ6, ВТ14(Б), ВТ14(А), ВТ14]; *в* — сплавы со структурой β + α′ + α-фаз при повышенном и высоком содержании β-фазы (α + β-сплав ВТ16, метастабильный β-сплав ВТ15)

ставляет собой пересыщенный α-твердый раствор и образуется преимущественно в низколегированных сплавах титана, α′-фаза по типу и параметрам решетки не отличается от равновесной α-фазы. В более легированных сплавах образуется дополнительная мартенситная α″-фаза, также представляющая собой пересыщенный α-раствор, но с более измененной напряженной решеткой. Однако из-за малого объемного эффекта мартенситные α′- и α″-фазы значительно более пластичны и менее прочны, чем мартенсит в сталях, что является благоприятным фактором при сварке титана. Превращение β-Ti → α-Ti происходит с уменьшением объема примерно на 0,13%.

Легирование титана, как правило, приводит к снижению пластических свойств и ухудшению свариваемости, которое выражается в большей чувствительности к термическому циклу — к явлениям, вызывающим понижение пластичности в связи с возможным образованием хрупких фаз при охлаждении и старении. Структурные превращения, приводящие к изменению механических

свойств металла сварного соединения, зависят от времени ($t' + t''$) пребывания его при температурах выше температуры $\alpha \rightleftarrows \beta$-превращения (рис. 4, t' — при нагреве, t'' — при охлаждении) и от скорости охлаждения w_0. Параметры термического цикла зависят от способа (табл. 4) и режимов сварки.

4. Сравнение параметров термического цикла околошовной зоны при сварке стыковых соединений технического титана различными способами [68]

Толщина металла в *мм*	Способ сварки	$t' + t''$ в *сек*	w_0 в *град/сек*
0,2	Аргоно-дуговая	3,2	200
2		6	90
5	Под флюсом	13,5	31
70×100	Электрошлаковая	235	2,5

Наряду с мартенситным превращением ($\beta \rightarrow \alpha'$) могут проходить процессы образования промежуточных метастабильных фаз $\beta \rightarrow \beta + \omega \rightarrow \beta + \alpha(\alpha')$ и интерметаллидных соединений ($\beta \rightarrow \alpha + \gamma$), охрупчивающих металл. С целью повышения пластических и прочностных свойств сварных соединений α-сплавов титана, стабильных ($\alpha + \beta$)-сплавов мартенситного типа целесообразно производить сварку на минимальных погонных энергиях (рис. 4, *а* и 5). Титановые сплавы, подвергающиеся упрочняющей термообработке, с малым и средним количеством остаточной β-фазы системы Ti — Al — V (ВТ6, ВТ6С), Ti — Al — Mo (ВТ-14) для повышения пластичности сварных соединений целесообразно сваривать на мягких режимах с малыми скоростями охлаждения (рис. 4, *б*).

Высоколегированные ($\alpha + \beta$)-сплавы с высоким содержанием β-фазы (ВТ16) или сплавы со структурой метастабильной β-фазы (ВТ15) целесообразно варить на средних и жестких режимах, так как высокое содержание β-фазы в околошовной зоне и шве обеспечивает высокую пластичность сварных соединений после сварки (рис. 4, *в*). При малых скоростях охлаждения пластичность падает из-за появления α- и α'- фаз. Сварные соединения упрочняемых титановых сплавов подвергают после сварки упрочняющей термической обработке (закалка и старение). Оптимальные скорости охлаждения приведены в работе [68].

Поры при сварке титана и его сплавов чаще всего располагаются в виде цепочки по зоне сплавления, вызывая снижение статической и динамической прочности сварных соединений.

Важной положительной особенностью большинства титановых сплавов является их стойкость против образования кристаллизационных трещин, благодаря узкому интервалу кристаллизации и высокой пластичности в этом интервале. Титановые сплавы обладают наибольшей стойкостью против образования горячих трещин по сравнению с другими конструкционными металлами.

Серьезной проблемой свариваемости титановых сплавов является склонность сварных соединений к задержанному разрушению и образованию холодных трещин вследствие повышенного содержания водорода в сварном соединении в сочетании с напряжениями первого рода (остаточными сварочными и от внешней нагрузки). Влияние водорода на склонность к трещинообразованию усиливается при увеличении содержания других вредных примесей (кислорода и азота) и вследствие общего снижения пластичности при образовании хрупких фаз в процессе охлаждения и старения. Водород вызывает охрупчивание титановых сплавов в результате гидридного превращения и адсорбционного эффекта понижения прочности.

Наибольшее влияние водород оказывает на α-сплавы в связи с ничтожной растворимостью в них. Растворимость водорода в β-фазе значительно выше, поэтому сплавы, содержащие β-фазу, менее чувствительны к водородному охрупчиванию. С повышением растворимости водорода в сплавах титана (при

увеличении содержания β-фазы и Al) роль адсорбционного эффекта возрастает. Механизм задержанного разрушения и образования холодных трещин в сплавах рассмотрен в работе [68].

Следует учитывать насыщение водородом сварных соединений и в процессе их технологической обработки и эксплуатации. Например, в процессе технологического травления и эксплуатации в кислых средах [52].

Радикальными мерами по борьбе с трещинообразованием являются: снижение водорода в металле шва и околошовной зоны рассмотренными выше методами и снятие остаточных сварочных напряжений; следует также предотвратить возможность наводораживания сварных соединений при эксплуатации путем выбора сплавов рациональной композиции для работы в средах, где возможно насыщение водородом.

Специфические физические свойства титана наряду с вышерассмотренными особенностями сварки определяют ряд дополнительных особенностей. Высокая температура плавления титана требует применения при сварке плавлением концентрированных источников тепла. Однако в связи с более низким, чем у стали, коэффициентом теплопроводности, более высоким электрическим сопротивлением и меньшей теплоемкостью для сварки плавлением титана тратится меньше энергии, чем для углеродистых сталей. Энергетические показатели и режимы сварки титана близки к таковым нержавеющих аустенитных сталей. Титан немагнитен, поэтому при сварке исключается дутье дуги. В связи с сочетанием низких коэффициентов теплопроводности, линейного расширения и модуля упругости величина остаточных

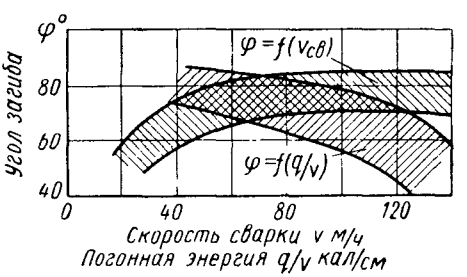


Рис. 5. Влияние погонной энергии и скорости сварки на угол загиба сварных соединений сплава ОТ4 толщиной 0,8 мм

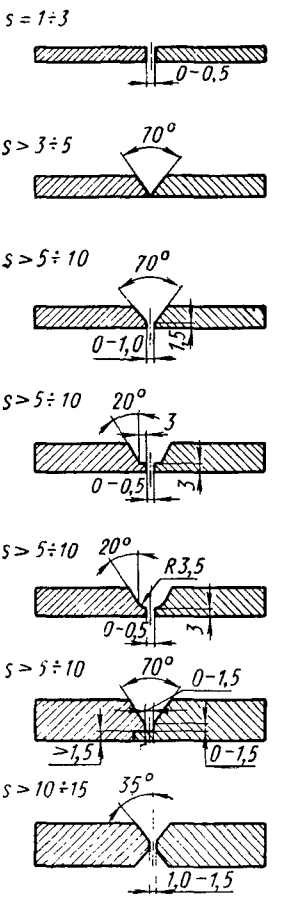


Рис. 6. Основные типы разделок кромок

напряжений в сварных соединениях титана меньше предела текучести и составляет для большинства титановых сплавов при сварке на оптимальных режимах приблизительно 0,6 σ_T. Высокий коэффициент поверхностного натяжения титана (1510 ± 18 *эрг/см*^{2} при температуре кристаллизации в вакууме и атмосфере гелия) в сочетании с малой вязкостью в расплавленном состоянии (с увеличением температуры коэффициент вязкости меняется от 0,89 *сст* при

1730° С до 0,36 *сст* при 1920° С) вызывает необходимость более тщательной сборки деталей под сварку по сравнению со сталями.

Для оценки свариваемости титановых сплавов применяют три основные группы испытаний: определение механических свойств сварного соединения; оценка склонности к трещинообразованию в процессе и после сварки; испытания на конструктивную прочность. Методика этих испытаний в целом аналогична испытаниям для сталей. Следует подчеркнуть, что титановые сплавы являются высокопрочными материалами, чувствительными к концентраторам напряжений. Поэтому главной характеристикой титановых сплавов и их сварных соединений, определяющих конструктивную прочность сварных конструкций, является пластичность. Наиболее чувствительными характеристиками пластичности для титановых сплавов являются испытания на изгиб — статические и динамические. Для листовых титановых сплавов результаты испытаний на угол загиба являются одним из основных критериев свариваемости. При оценке стойкости титановых сплавов и их сварных соединений против образования холодных трещин применяют: испытания с постоянной нагрузкой (осевой или изгибающей); испытания с постоянной изгибающей деформацией, в том числе с использованием форсированных вариантов испытания на длительный изгиб путем ступенчатого увеличения стрелы изгиба по мере релаксации напряжений по времени; жесткие технологические пробы, например, крестовую. Листовые титановые сплавы на конструктивную прочность испытывают на двухосное растяжение (методика МВТУ) и гидравлической нагрузкой сварных сосудов.

Подготовка и сборка под сварку [40, 59, 68, 49, 21 и др.]. Разрезка свариваемых заготовок в общем случае должна производиться механическим путем. Может быть использована также газовая и плазменная резка с последующей механической обработкой кромок. Газовая резка должна производиться на повышенной по сравнению со сталью скорости при одновременном снижении мощности подогревающего пламени с целью уменьшения теплового воздействия. Сварные соединения, выполненные непосредственно после газовой резки, обладают низкой пластичностью и склонны к растрескиванию в условиях напряженного состояния. Удаление поверхностного слоя с газового реза механическим путем на глубину не менее 1 *мм* позволяет получить качественное сварное соединение [21].

Принципиально разделка кромок при сварке титановых сплавов не отличается от разделок, применяемых для сталей. В зависимости от толщины свариваемого металла сварку производят без разделки и с V, U, X и Х-образными разделками (рис. 6). Рекомендуется также применение замкового соединения. Сварка деталей из титановых сплавов должна производиться из металла, прошедшего специальную обработку по снятию поверхностного газонасыщенного (альфированного) слоя. Такой обработке должны быть подвергнуты детали, изготовленные методом литья и горячей пластической деформации (поковки, прокат и т. д.), а также прошедшие термическую обработку в печах без защитной атмосферы. Удаление альфированного слоя может производиться: травлением с предварительной и последующей механической обработкой и механическими способами. Технология удаления альфированного слоя с применением травителей предусматривает:

а) предварительное рыхление альфированного слоя дробеструйной или пескоструйной обработкой;

б) травление в кислотном травителе следующего состава (на 1 *л* раствора): соляная кислота (уд. вес 1,19) 340—390 *мл*; азотная кислота (уд. вес 1,40) 35—60 *мл*; фтористый натрий 50 *г*;

в) последующая механическая зачистка кромок на ширине 10—15 *мм* с каждой стороны металлическими щетками, шаберами для удаления тонкого слоя металла.

Перед началом сборочно-сварочных работ необходимо проверить чистоту деталей, очистить их от загрязнений металлической щеткой и обезжирить органическим растворителем (ацетон, авиационный бензин, для обезвоживания —

этиловый спирт). Рекомендуется следующая технология обезжиривания: промывка свариваемых кромок и прилегающих к ним поверхностей на ширину не менее 20 *мм* бензином марки Б-70, используя бязь, капроновые или волосяные щетки, а затем этиловым спиртом-ректификатом или ацетоном. Допускается промывка одним ацетоном.

По сравнению со сборкой стальных конструкций сборка конструкций из титана и его сплавов под сварку имеет следующие особенности: а) необходимость более высокого качества сборки в связи с жидкотекучестью и высоким коэффициентом поверхностного натяжения расплавленного титана; б) недопустимость правки и подгонки деталей с использованием местного нагрева ацетилено-кислородным пламенем; в) трудность правки и подгонки деталей в холодном состоя-

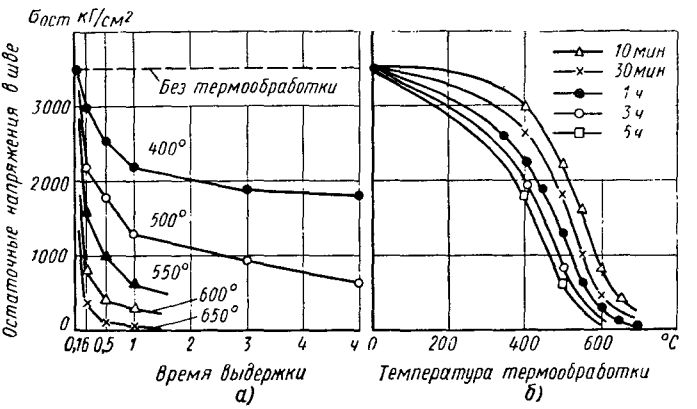


Рис. 7. Зависимость величины остаточных напряжений в шве для сплава ОТ4-1 [32]: *а* — от времени выдержки в печи при различных температурах; *б* — от температуры при различном времени выдержки в печи

нии в связи со значительным пружинением титана; г) необходимость надежной защиты шва при сварке плавлением от доступа воздуха с обратной стороны шва при выполнении прихваток.

Присадочные материалы. В качестве присадочных материалов при сварке плавлением используют холоднотянутую проволоку и прутки, изготовленные из листового металла. При всех способах сварки проволоку применяют без покрытий. Выбор сварочной проволоки определяется условиями сварки и эксплуатации конструкций. Состав проволоки должен быть близок составу основного металла. Сварочную проволоку из титана и его сплавов (ВТ1, ВТ2, ОТ4, ВТ5, ВТ6 и др.) изготовляют диаметром 0,8—7 *мм* и подвергают вакуумному отжигу.

Термическая обработка сварных соединений. Упрочнение титановых сплавов с помощью термообработки достигается в отличие от сплавов на основе железа преимущественно за счет явлений старения. В конструкциях титановые сплавы могут использоваться в состоянии прокатки или отжига или в состоянии после упрочняющей термообработки. К термически стабильным сплавам первого типа, к которым упрочняющая термообработка не применяется, относится технический титан и его α- и $\alpha + \beta$-сплавы мартенситного класса.

Упрочнение их достигается целиком за счет легирования α-твердого раствора. Для этих сплавов применяют отжиг для снятия остаточных сварочных напряжений ($T = 500 \div 600°$ С, выдержка 0,5—1 ч, рис. 7) и для правки тонкостенных конструкций, которые для этой цели выдерживают в жестких приспособлениях при температурах 600—650° С в течение 0,5—1 ч.

К сплавам второй группы, применяемым в состоянии после упрочняющей термообработки, относятся сплавы с α + β-структурой и метастабильные β-сплавы. Перед сваркой основной металл этих сплавов подвергают закалке или отжигу, а после сварки — закалке и старению. Длительный изотермический нагрев закаленного сплава в субкритическом интервале температур (старение) приводит к распаду β-фазы с выделением дисперсной α-фазы, который может сопровождаться промежуточными превращениями с выделением метастабильной ω-фазы и интерметаллидов. Этот процесс сопровождается резким повышением прочности и снижением пластических свойств. Термообработка производится в специальных контейнерах с инертной средой в печах обычного типа и в вакуумных.

Способы, техника и технология сварки

Современные способы сварки титановых сплавов классифицированы в табл. 5. Наиболее эффективный и широко распространенный вид сварки титана — сварка плавлением. Большая часть сварных титановых конструкций изготовляется дуговой сваркой в инертных газах: аргоне, гелии или смеси их. Для сварки листовых конструкций средних толщин широко используется сварка под флюсом, а для толстостенных деталей — электрошлаковая. Для ряда изделий из титана успешно применяется электронолучевая сварка. Вакуумно-дуговая сварка плавящимся электродом и сварка лазером находятся преимущественно в стадии лабораторных и опытно-промышленных исследований. Из методов сварки давлением широкое промышленное применение имеет контактная сварка: точечная, шовная и стыковая. Сварка токами радиочастоты используется при изготовлении труб из титана. Остальные методы сварки давлением имеют ограниченную область применения.

Электродуговая сварка в среде инертных газов. В промышленности применяют следующие разновидности этого способа: автоматическую, полуавтоматическую и ручную сварку неплавящимся электродом постоянно горящей и импульсной дугой с присадочным металлом и без него, а также автоматическую и полуавтоматическую сварку плавящимся электродом.

Для сварки титана может быть использовано стандартное сварочное оборудование, снабженное дополнительными устройствами для защиты зоны сварки, а также специализированные сварочные горелки и головки. В качестве инертных газов применяют аргон чистый марок А и Б по ГОСТу 10157—62 и гелий высокой чистоты по ВЧ МРТУ 51-04-65. Для защиты зоны дуги и расплавленной ванны необходимо использовать аргон состава А. Для защиты остывающей части шва и обратной стороны шва неответственных изделий допускается применять аргон состава Б. Гелий и его смеси с аргоном целесообразно использовать при дуговой сварке плавящимся электродом листов большой толщины (8—10 *мм*). При сварке в гелии необходимый для защиты сварочной ванны расход газа в 2—3 раза, напряжение на дуге в 1,4—1,6 раза и ширина зоны расплавления в 1,4 больше, чем при сварке в аргоне.

Защита зоны сварки может быть местной и общей (табл. 6). 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. 8 в качестве примера приведены конструктивные схемы защиты при сварке труб из титана и других активных металлов. Общая защита сварного соединения и изделия осуществляется при сварке в камерах с контролируемой атмосферой (типа ВКС-1, В4АС, 4СКА-4 и др.) и в специализированных боксах (обитаемых камерах) с обеспечением в них условий для работы сварщиков. Камеры вакуумируют до 10^{-2}—10^{-4} *мм рт. ст.*, после чего их заполняют инертным газом с избыточным давлением 0,1—0,3 *кГ/см*^{2}. Контроль состава среды осуществляется газоанализаторами и спектральными методами.

Улучшение условий защиты металла, нагретого до температур активного поглощения газов, достигается применением мер, уменьшающих зону нагрева

5. Классификация способов сварки титановых сплавов

6. Способы защиты титана при сварке в инертных газах

Защита	Защищаемая зона	Способ защиты
Местная	Внешняя поверхность металла	Специальные сопловые насадки (увеличенного размера, с газовой линзой, с двойным газовым потоком, профилированные и др.). Газозащитные приставки. Микрокамеры (жесткие, эластичные). Газовые колпаки. Дополнительный поддув инертного газа
	Внутренняя поверхность металла	Подкладки с поддувом инертного газа. Специальные козырьки для поддува. Заглушки для заполнения внутренней полости в зоне сварки инертным газом (жесткие, мягкие, полужесткие, растворимые). Защитные карманы. Продувка внутренней полости инертным газом
	Дополнительные технологические способы, облегчающие защиту внешней и внутренней поверхности	Уменьшение критической зоны нагрева: применение теплоотводящих подкладок, накладок, ползунов; охлаждение проточной или распыленной водой; применение фтористых флюсов; сварка на минимальной погонной энергии. Нанесение покрытий на зону нагрева (фтористые флюсы, хлористый натрий, металлизация). Ограждение рабочего места и зоны сварки от ветра и сквозняков
Общая	Защита всего изделия	Камеры с контролируемой атмосферой (жесткие, мягкие; с предварительным вакуумированием, без вакуумирования, с многократным или однократным использованием инертного газа) Специальные боксы (обитаемые камеры)

(сужение изотерм 350—400° С и выше) и предупреждающих контакт нагретой поверхности с воздухом.

Сварка вольфрамовым электродом в среде инертных газов. Режимы сварки постоянно горящей дугой приведены в табл. 7—12 (см. также «Справочник по сварке». Т. 2, стр. 542—552). Сварка производится постоянным током прямой полярности от стандартных источников питания. При толщине металла до 3—4 *мм* сварку обычно выполняют за один проход, при большей толщине требуется многопроходная сварка.

При сварке вольфрамовым электродом применяют вольфрамовые прутки (ТУ-ВМ2-529-57). Лучшая стойкость достигается при использовании лантанированных вольфрамовых прутков (ВТУВЛ № 24-6-62). Один и тот же электрод не рекомендуется применять в течение длительного времени, так как на нем может образоваться легкоплавкая эвтектика вольфрама и свариваемого металла, капля которого может попасть в шов и загрязнить его.

Не допускается касание вольфрамовым электродом свариваемых деталей, так как это приводит к загрязнению швов. По возможности следует использовать устройства для автоматического направления электрода, что уменьшает возможность смещения дуги с оси шва и предупреждает непровары.

Сварку рекомендуется начинать и заканчивать на заходных и выходных пластинах для предупреждения непровара в начале шва и прожога в его конце.

Увеличение глубины проплавления и производительности сварки достигается при использовании способа сварки погруженной (заглубленной) дугой. Сущность способа заключается в использовании повышенных токов с принудительным погружением дуги ниже поверхности свариваемых кромок. Таким способом можно сваривать без применения разделки кромок и присадочного металла металл толщиной до 10 *мм* (табл. 13).

Применение фтористых флюсов при аргоно-дуговой сварке титановых сплавов позволяет снизить погонную энергию по сравнению с аргоно-дуговой свар-

кой без флюса (табл. 14), уменьшить зону термического влияния, уменьшить пористость швов и улучшить условия защиты металла от взаимодействия с воздухом. Используются флюсы систем SrF_2 — LiF (АНТ-15А); CaF_2—MgF_2 (АНТ-17А); CaF_2—LiF—LaF_5 (АНТ-19А). Флюс разводится этиловым спиртом до получения

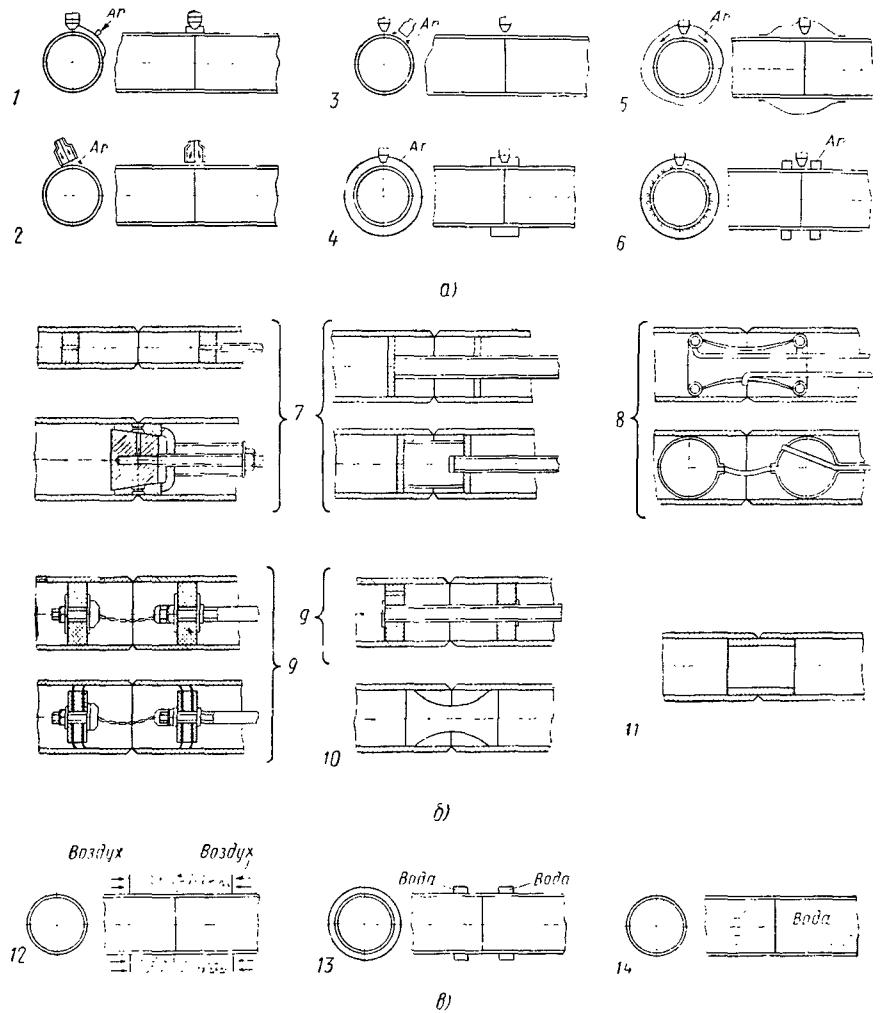


Рис. 8. Конструктивные схемы защиты при аргоно-дуговой сварке труб из титана и других активных металлов [54]: *а* — защита наружной стороны стыка; *б* — защита обратной стороны шва при сварке стыков; *в* — дополнительные способы улучшения защиты; *1* — газозащитная приставка; *2* — горелка с уширенным 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* — ограждение палаточного типа; *13* — охлаждение кольцевыми накладками; *14* — охлаждение проточной водой или распылением

7. Ориентировочные режимы ручной аргоно-дуговой сварки титана и его сплавов [49]

Толщина материала в *мм*	Диаметр вольфрамового электрода в *мм*	Диаметр присадочной проволоки в *мм*	Сварочный ток в *а*	Расход аргона для защиты в *л/мин*		Число проходов
				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			
4,0 5,0 6,0			130—140	10—12	2—4	2 2—3 2—4
7,0 10,0			140—150 150—170			4—5 11—15

8. Режимы ручной аргоно-дуговой сварки труб из титана [54]

Толщина стенки трубы в *мм*	Присадочный материал		Диаметр вольфрамового электрода	Вылет электрода из сопла	Сварочный ток в *а*		Расход аргона в *л/мин*		
	Диаметр проволоки	Сечение прутка			Первый шов	Последующие швы	в горелку	в приставку	внутри труб
	в *мм*								
2	Без присадки 1,4—2,0	— 1×2	2—4	5—8	70—90 —	— 110—120	6—8	6—8	4—5
3	Без присадки 1,2—1,6	2×2	2—4	5—8	90—100 —	110—120	6—8	6—8	4—5
4	Без присадки 2—3	2×2 2×3	2—4	6—10	110—120	130—140	6—8	6—8	4—5
5—6	Без присадки 2—3	2×2 2×3	2—4	6—10	110—120 —	130—140	6—8	6—8	6—8
7—9	Без присадки 2—3	3×3	2—4	6—10	170 —	210—240	6—8	6—8	6—8
10—12	Без присадки 3—4	3×3	2—4	6—12	190 —	220—250	8—10	8—10	6—8
13—16	Без присадки 4—5	4×4 5×5	4	6—12	190 —	220—250	8—10	8—10	6—8

9. Режимы полуавтоматической аргоно-дуговой сварки вольфрамовым электродом [8]

Толщина в мм	Положение в пространстве	Диаметр присадочной проволоки в мм	Сварочный ток в а		Скорость подачи присадочной проволоки в м/ч	
			Корневой шов	Заполнение разделки и усиление шва	Корневой шов	Заполнение разделки и усиление шва
	Стыковое соединение					
4–5	Нижнее	1,6	160–200	—	60–80	—
	Потолочное	2,0	280–330	—	70–100	—
	Вертикальное	1,6	160–200	-	60–80	-
	Горизонтальное	2,0	250–300	-	60–90	-
6–7	Нижнее	1,6	220–270	230–280	80–100	90–110
	Потолочное	2,0	300–350	330–380	80–110	90–120
	Вертикальное	1,6	200–250	200–250	70–90	70–90
	Горизонтальное	2,0	280–330	300–350	70–100	80–110
8–12	Нижнее	1,6	230–280	280–330	80–110	100–140
	Потолочное	2,0	300–350	350–400	90–120	100–160
	Вертикальное	1,6	200–250	250–300	80–100	90–120
	Горизонтальное	2,0	300–350	300–350	80–110	90–140
	Тавровое соединение					
4–5	Нижнее	1,6	160–200	—	60–80	—
	Потолочное	2,0	200–250	—	60–80	—
	Вертикальное	1,6	140–180	—	60–80	—
	Горизонтальное	2,0	200–250	—	60–80	—
6–7	Нижнее	1,6	200–250	230–280	70–100	75–110
	Потолочное	2,0	220–270	300–350	65–90	70–120
	Вертикальное	1,6	200–250	230–260	65–90	70–100
	Горизонтальное	2,0	220–270	280–330	65–90	70–120
8–12	Нижнее	1,6	220–270	300–350	70–100	100–160
	Потолочное	2,0	250–300	350–400	70–100	100–160
	Вертикальное	1,6	220–270	280–330	70–100	90–120
	Горизонтальное	2,0	250–300	320–370	70–100	90–120

10. Производительность наплавки при ручной и полуавтоматической аргоно-дуговой сварке с присадкой вольфрамовым электродом [8]

Толщина в мм	Ручная сварка			Полуавтоматическая сварка		
	Диаметр прутка в мм	Сварочный ток в а	Производительность наплавки в кг/ч	Диаметр проволоки в мм	Сварочный ток в а	Производительность наплавки в 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

11. Ориентировочные режимы механизированной аргоно-дуговой сварки вольфрамовым электродом без присадочного материала стыковых соединений титана и его сплавов [49]

Толщина материала в *мм*	Диаметр вольфрамового электрода в *мм*	Сварочный ток в *а*	Скорость сварки в *м/ч*	Установочная длина дуги в *мм*	Расход аргона для защиты в *л/мин*		
					дуги	остывающего шва [1]	обратной стороны шва
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	2,0–2,5	100–150					
2,5		140–200	25–30	1,5–2,0	7–10	5–7	3–4
3,0	2,5–3,0	180–200					

[1] В зависимости от условий производства при сварке листов толщиной до 1,5 *мм* дополнительную подачу газа в приставку можно не применять.

12. Ориентировочные режимы механизированной аргоно-дуговой сварки вольфрамовым электродом с подачей присадочного материала стыковых соединений титана и его сплавов [49]

Толщина листов в *мм*	Диаметр вольфрамового электрода в *мм*	Диаметр присадочной проволоки в *мм*	Сварочный ток в *а*	Скорость сварки в *м/ч*	Установочная длина дуги в *мм*	Расход аргона для защиты в *л/мин*			Число проходов
						дуги	остывающего шва [1]	обратной стороны	
1,0	1,5–2,0	1,5	80–120	25–40	1,5–1,7	5–8	3–5	2–3	1
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									2
10,0				15–20	—	10–12			8

[1] В зависимости от условий производства при сварке листов толщиной до 1,5 *мм* дополнительную подачу газа в приставку можно не применять.

13. Режимы автоматической сварки титана погруженной дугой [12]

Толщина металла в *мм*	Способ сварки	Сварочный ток в *а*	Напряжение дуги в *в*	Скорость сварки в *м/ч*
	Двусторонняя сварка			
16	Погруженной дугой без присадки (слои 1 и 2)	700—750	15—18	30—35
	Поверхностной дугой с присадкой (слои 3 и 4)	320—360	20—25	12—15
25	Погруженной дугой без присадки (слои 1 и 2)	1200—1250	16—18	28—30
	Поверхностной дугой с присадкой (слои 3 и 4)	340—400	24—28	13—15
	Односторонняя сварка			
5	Однопроходная погруженной дугой сплава ВТ6С	220—245	9—10	12
7		270—290	9—10	10—12

14. Режимы аргоно-дуговой сварки титана с флюсом АНТ-15А и без него [31]

Толщина металла в *мм*	Способ сварки	Сварочный ток в *а*	Напряжение дуги в *в*	Погонная энергия в *кал/см*
0.8	С флюсом	20	9—10	110
	Без флюса	45	8—8.5	175
2,5	С флюсом	70	9—10	425
	Без флюса	140	8.5—9	585
4,0	С флюсом	135	10—11	819
	Без флюса	260	9—10	1207
6,0	С флюсом	180	10—11	1092
	Без флюса	320	10—11	1634

Примечания: 1. Во всех случаях скорость сварки 10 *м/ч*.
2. Сварка металла толщиной 4 и 6 *мм* без флюса выполнялась погруженной дугой.

жидкой пасты (30 *г* флюса и 100 *г* спирта), которая наносится на кромки свариваемых деталей. Сварка производится после улетучивания спирта.

Для сварки тонколистового металла (≤2,5 *мм*) целесообразно применять импульсную сварку (табл. 15) без присадочной проволоки.

Сварка вольфрамовым электродом может применяться для соединения деталей внахлестку точками путем сквозного проплавления неподвижной дугой верхней детали и сплавления ее с нижней. Технология точечной сварки деталей из титана приведена в работе [44].

При сварке сжатой дугой (табл. 16) в качестве источника тепла используется дуговой разряд между вольфрамовым электродом и изделием. Сжатие и стабилизация дуги осуществляются с помощью медного охлаждающего сопла и потока плазмообразующего газа, пропускаемого через сопло. Сварка производится на постоянном токе прямой полярности. Используют источники питания с напряжением холостого хода не менее 80 *в* (ИПП-120, ПС-500, ИПИД-200 и др.). Процесс сварки осуществляется внутри микрокамеры. Благодаря этому обеспечивается надежная защита зоны сварки при малом расходе инертного газа. Для улучшения защиты применяют дополнительный поток защитного газа.

При высоком качестве основного и присадочного материала, соблюдении условий защиты и оптимальных режимах сварки вольфрамовым электродом

15. Режимы автоматической аргоно-дуговой импульсной сварки вольфрамовым электродом [39]

Толщина в *мм*	Ток в *а*		Напряжение дуги в *в*	Скорость сварки в *м/ч*	Длительность в *сек*		Установочная длина в *мм*	Диаметр электрода в *мм*	Расход аргона для защиты дуги и шва в *л/мин*
	сварочный	дежурной дуги			импульса	паузы			
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	4–5	10–11	18–25	0,14–0,22	0,2–0,34	1,2	1,5–2	5–7
1,5	120–170	4–6	11–12	16–24	0,16–0,24	0,2–0,36	1,2	2,2–3	6–8
2	160–210	6–8	11–12	14–22	0,16–0,24	0,2–0,36	1,2–1,5	2,5–3	6–8

16. Ориентировочные режимы автоматической сварки вольфрамовым электродом сжатой дугой титановых сплавов (А. В. Петров)

Толщина металла в *мм*	Проход	Сварочный ток в *а*	Скорость сварки в *м/ч*	Расход газа в *л/мин*		Диаметр электрода в *мм*
				плазмообразующего	защитного	
6	Первый	220	21,5	10,5–11	12–13	2,2–2,5
	Второй	180	12–12,5	1,5–2	7–8	
8	Первый	220	11,5–12	10,5–11	12–13	
	Второй	180	10–11	1,5–2	7–8	
10	Первый	300	8–9	8–9	12–13	2,5–3
	Второй	180	10–12	1,5–2	7–8	

Примечания: 1. Напряжение дуги 18–20 *в*.
2. Вылет электрода 7,8 ± 0,2 *мм*.
3. Диаметр сопла 6 *мм*.
4. Высота сопла 4 ± 0,5 *мм*.
5. Длина микрокамеры 200–250 *мм*.

механические свойства сварных соединений титана и его сплавов (табл. 17, 18) близки к свойствам основного металла. Лучшие свойства достигаются при автоматизированных методах сварки.

Сварка плавящимся электродом в среде инертных газов. Этот способ применяют для стыковых, тавровых и нахлесточных соединений из металла толщиной более 4 *мм* в нижнем положении. Сварку выполняют на обратной полярности на режимах, гарантирующих струйный перенос металла (табл. 19).

При сварке в аргоне наблюдается меньшее разбрызгивание металла, большая глубина проплавления, меньшая 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*, а при автоматической сварке стыковых и угловых соединений — диаметром

17. Механические свойства основного металла и сварных соединений, выполненных автоматической аргоно-дуговой сваркой вольфрамовым электродом без присадочного материала

Марка сплава	Толщина в *мм*	Механические свойства				
		основного металла			сварных соединений	
		$\sigma_в$ в *кГ/мм²*	δ в %	φ в *град*	$\sigma_в$ в *кГ/мм²*	φ в *град*
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

2–5 *мм*. Способы защиты, материалы, приборы, сварочная оснастка — те же, что и при сварке вольфрамовым электродом.

18. Предел усталости технического титана и его сварных соединений [30]

Металл	Предел усталости в *кГ/мм²*	Отношение предела усталости к пределу прочности
Основной ВТ1	30,7	0,52
Сварное соединение:		
качественное	24,0	0,47
с недостаточной защитой	19,0	0,37
с непроваром	11,3	0,19

Сварка под флюсом [13, 15, 59]. 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 более. Защита обратной стороны осуществляется применением остающейся или флюсомедной подкладки или флюсовой подушки. Сварка может производиться с использованием стандартной сварочной аппаратуры. Ток постоянный обратной полярности. Флюсы бескислородные АНТ-1; АНТ-3, АНТ-5, АНТ-7 (табл. 20). Флюс перед употреблением должен быть тщательно высушен при 200—300° С; содержание влаги 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 и загрязнения металла шва газами и ухудшения стабильности процесса (табл. 21).

Режимы сварки приведены в табл. 22. Для автоматической сварки титана больших толщин (более 15 *мм*) рекомендуются более высокие плотности тока и применение двудуговой сварки.

В связи со специфическими физико-химическими свойствами титановой электродной проволоки к полуавтоматам для сварки титана предъявляются некоторые специфические требования: конструкция наконечника должна обес-

19. Режимы сварки [1] титана плавящимся электродом в среде инертных газов [9]

Диаметр электрода в *мм*	Сварочный ток в *а*	Напряжение дуги в *в*	Скорость сварки в *м/ч*	Вылет электрода в *мм*	Расход газа в *л/мин*	Диапазоны толщин стыковых соединений, свариваемых без разделки кромок, в *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	630–920	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

[1] В числителе – при защите в гелии, в знаменателе — при защите в аргоне.

20. Материалы и состав шихты флюсов АН-Т1 и АН-Т3

Материал	Содержание в вес. %	
	Флюс АН-Т1	Флюс АН-Т3
Фтористый кальций (CaF_2)	79,5	85,5
Хлористый барий ($BaCl_2 \cdot 2H_2O$)	19,0	10,0
Фтористый натрий (NaF)	1,5	1,5

21. Оптимальные вылеты электродной титановой проволоки при сварке под флюсом

Диаметр электродной проволоки в *мм*	1,2–1,5	1,5–2,5	1,5–3,0	3,0–4,0	4,0–5,0
Вылет в *мм*	12–13	13–14	14–16	16–18	18–22

печивать стабильность токоподвода на строго контролируемом 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 сварки титана применяют полуавтоматы толкающего (А-732) и тянущего (ПШЛ-10) типов. Режимы сварки приведены в табл. 23. Автоматическая и

22. Типичные режимы автоматической сварки под флюсом стыковых швов титана

Толщина металла в *мм*	Метод сварки	Диаметр электродной проволоки в *мм*	Сварочный ток в *а*	Напряжение дуги в *в*	Скорость в *м/ч*	
					электродной проволоки	сварки
2,5	Односторонний шов на остающейся подкладке	2	180—200	30—32	160—165	50
3	То же	2,5	240—260	30—32	160—165	50
4	»	2,5	270—290	30—32	185—190	50
5	Односторонний шов на медной подкладке	3	370—390	30—32	150—155	50
6	То же	3	390—420	30—32	170—175	50
8	»	4	540—600	32—34	45—100	45
8	Двусторонний шов	3	310—330	30—32	135—140	50
10	Односторонний шов на медной проволоке	4	600—620	32—34	110—115	45
10	Двусторонний шов	3	340—360	30—32	150—155	50
12	То же	3	350—400	30—32	160—165	50
15	»	3	390—420	30—32	175—180	50

23. Режимы полуавтоматической сварки титана под флюсом

Тип соединения	Скорость подачи электродной проволоки в *м/ч*	Сварочный ток в *а*	Напряжение дуги в *в*	Вылет электрода в *мм*
Двусторонний стыковой шов, толщина металла 6—8 *мм*	162—189	200—250	32—34	14—16
Нахлесточный шов, толщина 6—8 *мм*	215	250—280	32—34	14—16
Угловой шов сечением 8×8 *мм*	230	280—300	34—36	14—16

Примечание. Диаметр электродной проволоки 2 *мм*.

полуавтоматическая сварка под флюсом позволяет получать высокие свойства сварных соединений и металла шва (табл. 24).

24. Механические свойства шва при сварке под флюсом [13, 15]

Основной металл	Метод сварки	$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ	ψ	φ в *град*
		в *кГ/мм²*		в %		
ВТ1-2	Автоматическая	56,2	49,1	24,3	51,0	138
	Полуавтоматическая	55,6	48,7	20,4	48,2	170
ОТ4	Автоматическая	81,1	74,4	15,2	31,8	82
	Полуавтоматическая	80,6	75,1	17,2	32,6	79

Электрошлаковая сварка. Применяется для соединения заготовок (поковок) и деталей толщиной свыше 40 *мм*. Сварка может выполняться электродными проволоками диаметром 3—5 *мм*, пластинчатым электродом толщиной 8—14 *мм* и шириной, равной ширине свариваемого металла, или плавящимся мундштуком. Используется специализированная и стандартная аппаратура, переоборудованная применительно к сварке титана. Расплавленный основной и присадочный металл

защищают тугоплавкими фторидными флюсами типа АНТ-2 и АНТ-4 и дополнительно аргоном состава А. Сварку производят переменным током на минимальной погонной энергии, обеспечивающей устойчивый электрошлаковый процесс

25. Ориентировочные режимы электрошлаковой сварки титана [14, 18, 28]

Толщина металла в *мм*	Зазор между кромками в *мм*	Число электродов	Расстояние между электродами в *мм*	Сварочный ток в *а*	Напряжение в *в*	Вес засыпаемого флюса в *г*	Расход аргона в *л/мин*
Сварка пластинчатым электродом толщиной 10—14 мм							
30—50	23—25	—	—	1600—2000	14—18	80—120	5—7
50—80		—	—			120—200	7—10
80—100		—	—	2000—2400		200—250	10—12
100—120	24—26	—	—	2400—2800		250—300	12—14
Сварка проволочным электродом диаметром 4—5 мм							
40	30—32	1	—	680—1350	29—30	—	40
70	30—32				32—35	—	50
100	32—34	2	—	1360—2700	28—30	—	60
150	32—34				32—35	—	70
Сварка плавящимся мундштуком							
70	—	2	40	1300	22	—	9
110	—		80	1700	22	—	12

Примечания: 1. Сухой вылет при пластинчатом электроде 450—600 *мм*, при проволочном 50—70 *мм*.

2. Плавящийся мундштук: пластина толщиной 12 *мм*, проволока диаметром 3 *мм*, скорость подачи 198 *м/ч*.

и необходимое проплавление свариваемых кромок. Ориентировочные режимы сварки приведены в табл. 25. Механические свойства сварных соединений близки свойствам основного металла (табл. 26). Недостаток — крупнозернистая макро- и микроструктура, вызывающая понижение пластических свойств. Применение флюса АНТ-4 способствует повышению пластичности.

26. Механические свойства металла сварных швов поковок из сплавов титана при электрошлаковой сварке пластинчатым электродом [С. М. Гуревич]

Марка сплава	Металл	$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ	ψ	$a_н$
		в *кГ/мм²*		в %		в *кГм/см²*
ВТ1	Основной	50,6	44,8	19,3	55,2	5,5
	Шов	53,2	43,8	20,3	43,4	4,2
ОТ4	Основной	78,3	69,4	18,1	39,9	6,6
	Шов	78,3	71,4	11,5	30,6	3,7
ВТ6	Основной	96,0	85,5	8,8	17,6	4,2
	Шов	98,1	—	9,4	18,4	3,6

Электронолучевая сварка. Этот способ обеспечивает наилучшие условия защиты, однако находит ограниченное применение из-за сложности установок.

Высокая концентрация тепловой энергии при электроннолучевой сварке позволяет вести сварку на высоких скоростях и при малой энергоемкости процесса и получить сварные соединения титана с малой шириной шва и зоны термического влияния. Металл шва имеет мелкозернистую структуру.

Необходимым условием получения качественных сварных соединений является прецизионная сборка под сварку. Режимы сварки зависят от типа используемой электронной пушки, технологической оснастки, толщины металла, конфигурации и размеров изделия. Ориентировочные режимы сварки приведены в табл. 27.

27. Ориентировочные режимы электроннолучевой сварки титана (электронная пушка ЭП-60, режим по току — непрерывный) [59]

Толщина в *мм*	Ток[1] луча в *ма*	Расстояние от центра линзы до места сварки в *мм*	Ток в фокусирующей линзе в *а*	Скорость сварки в *м/ч*	Давление в сварочной камере в *мм рт. ст.*
0,8	5,5—6,0	65	0,085	40	$5 \cdot 10^{-5}$
1,2	9	65	0,085	40	$5 \cdot 10^{-5}$
2,5	15	65	0,085	40	$5 \cdot 10^{-5}$
3,0	14	37	0,124	20	$3 \cdot 10^{-4}$
5,0	16	35	0,126	22	$3 \cdot 10^{-4}$
6,0	23	34	0,112	19	$3 \cdot 10^{-4}$
7,0	26	33	0,112	22	$3 \cdot 10^{-4}$

[1] Ускоряющее напряжение для всех толщин 60 *кв*.

Вакуумно-дуговая сварка. Применяется для сварки титана толщиной 2—60 *мм* проволокой диаметром 1.5—5,0 *мм* на постоянном токе обратной полярности специализированными сварочными головками в вакуумных камерах. Основное преимущество — повышение показателей пластичности шва по сравнению с основным металлом, что объясняется дополнительной очисткой металла шва при сварке и уменьшением в нем газов и неметаллических включений при расплавлении металла в вакууме. По той же причине несколько уменьшен предел прочности и предел текучести металла шва (табл. 28).

28. Механические свойства сварных швов при вакуумно-дуговой сварке титана [71]

Сплав	Металл	$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ	ψ	$a_н$
		в *кГ/мм²*		в %		в *кГм/см²*
ВТ1	Основной	45—56	35—50	15—22	45	12,8
	Шов	48,6	39,3	28,4	53,0	16,8
ОТ4	Основной	77,0	60	17	40	5
	Шов	70,5	59,3	15,5	37,8	7,2

Ниже приводится примерный режим сварки титана толщиной 50 *мм* с V-образной разделкой электродом диаметром 3 *мм* с поперечными колебаниями: 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.*

Коррозионные свойства сварных соединений титана при сварке плавлением [52, 53, 67, 70]. Коррозионная стойкость сварных соединений титана равноценна основному металлу в средах, где титан находится в пассивном состоянии. В некоторых водных неокислительных средах сварные соединения могут подвергаться преимущественному по сравнению с основным металлом межкристаллит-

ному разрушению. Межкристаллитная коррозия сварных соединений титана по сравнению с нержавеющими сталями имеет менее локализованный характер

Опасным видом коррозионного разрушения сварных конструкций из титановых сплавов является разрушение вследствие наводораживания при коррозии в растворах неорганических кислот. Сварные соединения подвержены более интенсивному наводораживанию по сравнению с основным металлом вследствие наличия крупноигольчатой структуры мартенситного типа. Наводораживание приводит к резкому падению прочности и пластичности и к коррозионному растрескиванию. Для работы в таких средах целесообразнее использовать технический титан.

Вид и режимы сварки листового титана относительно мало влияют на коррозионную стойкость сварных соединений титана.

Контактная сварка. Благодаря высокому электрическому сопротивлению и малой теплопроводности титана контактная сварка последнего значительно облегчается и может выполняться на обычных машинах средней мощности. Происходящее в процессе точечной, роликовой и стыковой сварки сопротивлением плотное сжатие свариваемых деталей между собой препятствует доступу воздуха в зону сварки и не требует в связи с этим применения специальной защиты инертными газами. В случае сварки методом оплавления свариваемые поверхности защищены интенсивным выделением из зоны сварки паров и газов, оттесняющих окружающий воздух, однако дополнительная защита аргоном повышает пластичность стыковых соединений. Режимы сварки приведены в табл. 29—31.

29. Ориентировочные режимы точечной сварки титана [40, 45]

Сочетание свариваемых толщин в *мм*	Радиус сферы электродов в *мм* ± 10%	Сварочный ток в *ка*	Время сварки в *сек* ± 10%	Давление на электродах в *кГ*	Диаметр ядра точки в *мм*	Максимальная прочность на срез в *кГ*
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	75	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	100	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

30. Ориентировочные режимы роликовой сварки титана [40, 45]

Сочетание свариваемых толщин в *мм*	Радиус сферы роликов в *мм* ± 10%	Ширина плоских роликов в *мм* ± 10%	Сварочный ток в *ка*	Длительность сварочного импульса в *сек* ± 10%	Длительность паузы в *сек* ± 10%	Давление на роликах в *кГ*	Скорость сварки в *м/мин* ± 10%	Ширина шва в *мм*
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	4,5	7,0—8,0	0,12	0,25	250—350	0,7	4—5
1,2 + 1,2	75	6,5	8,0—9,0	0,16	0,30	350—400	0,7	5—6
1,5 + 1,5	100	6,5	8,5—9,5	0,20	0,40	400—500	0,6	6,0—6,5
2,0 + 2,0	100	7,5	11,0—12,0	0,25	0,50	400—500	0,6	7,0—7,5

Примечание. Прочность сварного соединения не менее 80% от прочности основного материала.

Сварка титана токами радиочастоты [59]. Процесс характеризуется высокой степенью концентрации тепла и высокой скоростью сварки. Применяется при изготовлении прямошовных труб.

31. Ориентировочные режимы [1] стыковой сварки титана оплавлением [40, 45]

Поперечное сечение материала в $мм^2$	Припуск в мм		Сварочный ток при оплавлении в $а$	Время сварки	
	Оплавление	Осадка		Подогрев в *мин*	Оплавление в *сек*
1000	10	8	29 500	2	3
2000				3	3
2500			31 200	5	4
3000	15	10	33 000	6	4
3500				7	5
4000				8	6

[1] Сварочный ток при подогреве 22 500 $а$, усилие при осадке 5000 $кГ$.

Основными параметрами режима являются мощность источника тока и скорость сварки. Наиболее высокое качество прямошовных труб из титана толщиной 1,5 *мм* достигается при скорости сварки 15 *м/мин* и потреблении мощности 30—35 *квт*. В процессе сварки необходима защита лицевой и внутренней стороны шва инертным газом.

Диффузионная сварка титана. Производится в вакууме $1 \cdot 10^{-3}$—10^{-4} *мм рт. ст.* при 800—1100° С, давлении 0.25—1 $кГ/мм^2$ (в зависимости от площади образца) и длительности нагрева 1—10 *мин* (в зависимости от температуры) (табл. 32).

32. Оптимальные режимы сварки титана с титаном, никелем и медью [3]

Свариваемый металл	Температура нагрева °С	Давление в $кГ/мм^2$	Длительность сварки в *мин*
Титан+титан	800	0.75	7
Титан+никель	700	1	
Титан+медь	850	0,5	

ЦИРКОНИЙ, ГАФНИЙ, ВАНАДИЙ, НИОБИЙ, ТАНТАЛ, ХРОМ, МОЛИБДЕН, ВОЛЬФРАМ

Цирконий. Цирконий существует в двух аллотропических модификациях — α и β. До температуры полиморфного превращения 862—865° С он имеет гексагональную плотноупакованную решетку, выше этой температуры — кубическую объемноцентрированную.

До температуры 400—500° С цирконий слабо реагирует с азотом, но уже при 800—900° С происходит сильное взаимодействие с образованием на поверхности нитрида ZrN. При 300—1000° С наблюдается интенсивное поглощение цирконием водорода с образованием гидрида $ZrH_{1,2}$.

Перед сваркой кромки деталей подвергают механической зачистке или травлению в водном растворе кислот (например, 45% HNO_3, 10% HF, остальное H_2O). Во избежание загрязнения циркония элементами внедрения сварку вольфрамовым электродом изделий проводят в защитных средах (инертные газы или вакуум) или применяют сварку взрывом, трением и др. При сварке плавлением сплавов циркония формирование швов достаточно хорошее, наружные дефекты отсутствуют. В случае образования пористости следует применять предваритель-

ный подогрев. При попадании азота в шов снижается его коррозионная стойкость в воде и паре.

Дуговую сварку вольфрамовым электродом производят на постоянном токе прямой полярности. В микроструктуре сварных швов наблюдается превращенная β-фаза, состоящая из пластин α-фазы типа видманштеттовой структуры. Сварные соединения циркония и его сплавов равнопрочны с основным металлом, а пластичность несколько ниже, чем у основного металла. Появление закалочной структуры в шве и околошовной зоне при охлаждении приводит к тому, что сварные соединения сплавов Zr — 1% Nb, Zr — 2% Nb и Zr — 3% Nb — 1% Sn в воде и паре корродируют более интенсивно, чем основной металл. Улучшить коррозионную стойкость сварного соединения можно с помощью последующего отжига при 575° С. При электроннолучевой сварке в вакууме тонкостенных оболочек из сплава циркалой-2 [29] следует обращать особое внимание на следующие факторы: размеры сварного соединения, подгонка, закрепление соединения под сварку, плавное перемещение изделий под лучом без вибраций. Разработана технология электроннолучевой сварки трубок из листов циркония толщиной 0,3 и 0,5 *мм* [80]. Зазор между кромками не должен превышать 0,1—0,2 *мм*, при этом ширина шва составляла 1—1,5 *мм* при толщине 0,3 *мм* и 0,8—1,2 *мм* при толщине 0,5 *мм*. Ток луча 4—12 *ма*, ускоряющее напряжение 19—20 *кв*, скорость сварки 45 *см/мин*. При испытании на растяжение соединения разрывались только по основному металлу.

Установлена возможность применения магнитного усилия сжатия для контактной сварки заглушек из циркалоя-2 с трубами топливных ядерных элементов, изготовленных из циркониевого сплава [84]. Этот метод обеспечивает минимальное изменение свойств соединяемых деталей без расплавления вещества, помещенного в трубу. Процесс, протекающий без оплавления деталей (в твердой фазе подобно диффузионной сварке), имеет следующие преимущества: высокое качество сварного соединения, обладающего мелкозернистой структурой; высокая производительность (250 сварок в 1 ч) и дешевизна (наиболее экономичен применительно к тепловыделяющим элементам ядерных реакторов); точный контроль времени протекания сварочного тока и его величины. Автоматическая схема регулирования сварочного цикла обеспечивает сварку одним неуравновешенным импульсом тока с амплитудным значением для циркония 77 500 $а/см^2$ (два импульса по 12 *мсек*), для вольфрама 232 000 $а/см^2$ (один импульс 5 *мсек*). Сплавы циркония можно успешно сваривать без защитной атмосферы, если время сварки меньше 20 *мсек*.

При сварке трением [72] изделий из сплавов циркония со сплавами никеля, которые применяют в конструкциях ядерных реакторов, необходимо, чтобы энергия, выделяемая в контакте при трении, была до 5,3 *квт* на 1 $см^2$ свариваемой площади, а усилие сжатия в процессе трения и осадки 700—5600 $кГ/см^2$. Рекомендуется проводить сварку на жестких режимах с продолжительностью всего процесса менее 10 *сек*.

Для соединения встык стержней диаметром 2,5—6,25 *мм* из сплавов циркалой-2 или циркалой-4 и нержавеющей стали типа 304, содержащей около 2% бора, применяют сварку трением с относительной скоростью вращения 6000 *об/мин* [73]. Рабочее давление 14—42 $кГ/мм^2$ прикладывают в течение 0,5—3,0 *сек*, после чего детали тормозят и дают усилие осадки также 14—42 $кГ/мм^2$. В машине предусмотрен маховик, поэтому возможна инерционная сварка трением этих материалов с запасенной в маховике энергией 130—1200 $кГ.м/см^2$ поперечного сечения свариваемых стержней. В патроне машины имеются канавки для грата, который после сварки удаляют механическим способом.

Разработан способ сварки взрывом циркония, а также титана, тантала, меди, алюминия или сплавов на их основе со сталью (углеродистой или нержавеющей) [75]. Во избежание образования хрупкого закаленного слоя в зоне сварки и повышения прочности соединения шероховатость поверхностей двух соединяемых металлических листов должна быть менее 0,7 *мкм*.

Предложено [76] сварку взрывом стали с титаном, цирконием, танталом или алюминием проводить после образования на поверхности стали очень тонкой окисной пленки, которая не ухудшает механической прочности зоны соединения. При этом не возникает твердый хрупкий промежуточный слой, являющийся причиной расслоения в зоне сварки. Сопротивление расслоению по сравнению с прежним способом сварки взрывом возрастает в 1,5—2 раза. Тонкий окисный слой на поверхности стали обычно образуется после нагрева ее до 600° С.

Гафний. Существует в двух модификациях — гексагональная плотноупакованная решетка сохраняется до температуры 1760° ± 35°, при которой происходит переход в объемноцентрированную. При нагревании на воздухе гафний окисляется с образованием двуокиси HfO_2, кроме того, в результате взаимодействия с азотом образуются нитриды.

Коррозионная стойкость гафния в воде и паре высоких параметров выше, чем у циркония, легирование цирконием до 30% значительно повышает коррозионную стойкость гафния в воде при 350° С, однако при этом механические свойства сплава понижаются. Свойства гафния незначительно изменяются под действием облучения, он поглощает и тепловые и надтепловые нейтроны, обладает хорошей коррозионной стойкостью в горячей воде и достаточно высокими механическими свойствами. Это единственный материал, удовлетворяющий всем требованиям, предъявляемым к материалам регулирующих стержней. Из гафния обычно изготовляют стержни специального, крестообразного профиля, причем сварка — единственный метод производства таких профилей [87]. Гафний — весьма дефицитный материал, поэтому из него изготовляют только ту часть регулирующего стержня, которая служит для поглощения нейтронов. Таким образом, сваривают гафний с гафнием, а также гафний со сплавом циркалой-2.

Перед сваркой плавлением для точной фиксации составных частей производят прихватку вольфрамовым электродом швами длиной 12—13 *мм* на расстоянии 75—100 *мм* друг от друга. При сварке гафния с циркалоем-2 толщиной 6,4 *мм* сила тока составляет 125—135 *а*, напряжение 14—18 *в*. Сварку осуществляют вольфрамовым электродом в камерах с инертной атмосферой (гелий или аргон, давление 1 *кГ/см*^{2}). Во избежание слишком сильного расплавления краев свариваемых частей сварку начинают и заканчивают на заходных планках. Режим сварки вольфрамовым электродом гафния толщиной 6,4 *мм* с циркалоем-2: ток 220 *а*, напряжение 16 *в*, скорость сварки 17 *см/мин*. Дугу ведут по гафнию на расстоянии 0,8—1,6 *мм* от стыка гафний-циркалой.

Провар шва определяют по провару на заходных планках такой же толщины, временно присоединяемых к свариваемой детали. После сварки эти планки удаляют, полируют, травят и рассматривают при увеличении не менее четырехкратного. Допускается, что часть гафния может остаться нерасплавленной при условии полного расплавления циркалоя по всей поверхности стыка. Испытания на ударную вязкость и на разрыв показывают, что сварные швы равнопрочны с основным металлом (в данном случае циркалой-2).

Возможно соединение гафния с титаном или цирконием методом прокатки. Образцы гафний-титан, прокатанные при 845—1070° С с общей степенью деформации 67% (10—20% за цикл), имеют удовлетворительную прочность на разрыв, но угол загиба составляет лишь 90°, причем разрушение происходит по стыку. Образцы гафний-циркалой-2, прокатанные при 845 и 955° С со степенью деформации 67 и 75% соответственно, обладают хорошей прочностью и выдерживают загиб до 90° без разрушений, но расслаиваются по стыку при попытке разъединить их зубилом.

Ванадий. Чистый ванадий (99,9%) — достаточно пластичный металл, обладающий хорошей технологичностью и свариваемостью. До 1550° С он имеет решетку объемноцентрированного куба. Предполагают, что выше 1550° С происходит аллотропическое превращение, однако данные о структуре второй аллотропической модификации не достоверны. Ванадий парамагнитен, при температуре 4,5° К переходит в сверхпроводящее состояние. При нагреве до 200—400° С ванадий поглощает водород, образуя гидрид, который в вакууме при 400° С

разлагается. На воздухе ванадий начинает окисляться при 300° С, а при 600—700° С интенсивно окисляется с образованием V_2O_5 (очень токсична!). При нагреве в среде азота нитрид ванадия образуется при температурах выше 800—900° С.

Наибольшее распространение получили сплавы ванадия с Ti, Nb, W, Zr. Пластичность некоторых сплавов систем V—Ti и V—Zr может быть выше, чем у нелегированного ванадия, прочность этих сплавов повышают с помощью добавок Al, Cr, Si.

Технический ванадий и сплав ванадия с 12% W в виде листов толщиной 1—2 *мм* можно соединять аргоно-дуговой сваркой вольфрамовым электродом (постоянным током на прямой полярности) и электронным лучом в вакууме [16]. Режимы сварки и механические свойства сварных соединений приведены в табл. 33. Сварные швы хорошо формируются, не имеют видимых следов окисления, поры и трещины отсутствуют (по данным рентгенопросвечивания). Угол загиба сварных соединений и основного металла составляет 180°.

33. Режимы сварки и механические свойства сварных соединений сплава ванадия с 12% W

Способ сварки	Толщина металла в *мм*	Ток в *а*	Напряжение в *в*	Скорость сварки в *м/ч*	$\sigma_в^*$	σ_T	δ в %
					в *кГ/мм²*		
Аргоно-дуговая вольфрамовым электродом	1 2	130—150 320	9-10 18	50	58,1	44,9	18
Электронолучевая	1 2	0,06—0,067 0,09-0,1	12 500—12 900 12 500-13 500	60	55,6	44,5	20,5
Основной металл: деформированный	—	—	—	—	96-98	92—96	3—4
отожженный	—	—	—	—	52—54	42—46	20—22

* Микрообразцы ⌀ 0,8 *мм*

Сварные соединения сплавов ванадия с 10% Ti и 1% Nb, а также с 10% Nb и 1% Ti, полученные дуговой сваркой вольфрамовым электродом в инертных газах, в отожженном состоянии имеют удлинение 5—10%.

Возможна сварка плавлением ванадия с Ti, Nb, Ta, Cr и медными сплавами, а также со сталями, содержащими не более 7—8% Ni [51]. Предложен присадочный материал для сварки плавлением ванадия и его сплавов с нержавеющими сталями, содержащими Fe, C, Cr и другие легирующие компоненты [10]. Присадочный материал содержит 0,002—0,006% C; 2—8% Ni, а содержание других легирующих компонентов соответствует составу свариваемой стали.

Ниобий. По комплексу свойств ниобий — один из наиболее перспективных тугоплавких металлов, он обладает достаточно высокой прочностью и жаропрочностью, имеет высокую пластичность при комнатной и минусовых температурах (до —200° С), высокую коррозионную стойкость в атмосферных условиях, среднюю плотность, не взаимодействует с водой, перегретым паром и жидкими щелочными металлами (литий, калий, натрий и др.). Интенсивное окисление ниобия начинается с 500° С, взаимодействие с водородом с 200—250° С, при нагреве в среде азота нитриды образуются, начиная с 600—800° С.

Свариваемость ниобия и его сплавов зависит от содержания в них элементов внедрения. Десятые и сотые доли процента этих элементов резко снижают пластичность и деформируемость, ухудшают коррозионную стойкость, свариваемость и обрабатываемость на станках. Поэтому свариваемость сплавов ниобия электронолучевой выплавки обычно лучше, чем выплавленных дуговым способом.

Существует значительное количество ниобиевых сплавов. Наиболее распространенные легирующие добавки: Mo, W, Zr, V, Ti, Hf, вводится также углерод, который с ниобием и указанными легирующими элементами образует карбиды, дополнительно упрочняющие сплавы.

Наибольшее распространение за рубежом получили малолегированные сплавы ниобия, например, FS-80 (0,75% Zr), D-36 (5% Zr, 10% Ti). Введение в ниобий значительных количеств вольфрама, молибдена или циркония приводит к снижению пластичности сплавов и ухудшению их свариваемости.

Пластичность сварных соединений зависит от чистоты свариваемого металла по элементам внедрения, особенно азота [20]. При концентрации азота более 0,03% и суммарной концентрации газов более 0,060—0,065% пластичность металла резко снижается.

Сварку (табл. 34) листового ниобия и его сплавов лучше производить на подкладках из нержавеющей стали.

34. Режимы электроннолучевой и аргоно-дуговой стыковой сварки вольфрамовым электродом ниобиевого сплава ВН2АЭ (3,5—4,7% Mo; 0,5—0,9% Zr; ≤ 0,05% C) [20]

Толщина металла в *мм*	Электроннолучевая сварка			Аргоно-дуговая сварка		
	Ток луча в *ма*	Напряжение в *кв*	Скорость сварки в *м/ч*	Ток в *а*	Напряжение в *в*	Скорость сварки в *м/ч*
0,5	25—30	17—17,5	20—30	85—90	8—9	30—40
0,8	45—50		30—40	110—120	8—9	30
1,0	65—70		30	150—160	10	40
1,5	85		30	190	12	30

Вакуумный отжиг сварных соединений при 1350° С в течение 1,5 ч резко повышает их пластичность (табл. 35).

Механические свойства сварных соединений ниобия и сплава с 6% W и 3% Та приведены в табл. 36.

35. Механические свойства сварных соединений сплава ВН-2АЭ ($\delta = 0.8$ *мм*)

Скорость сварки в *м/ч*	Вид сварки [1]	Предел прочности (средние данные) в *кГ/мм²*)	Угол загиба в *град*	Место разрушения [2]
20	ЭЛ	55,9	89	Шов
20	АД	58,3	131	Шов
30	ЭЛ	57,6	180	ЗТВ
50	ЭЛ	57,5	180	ЗТВ
70	ЭЛ	56,4	180	ЗТВ
70	АД	59,9	180	ЗТВ

[1] ЭЛ — электроннолучевая, [2] ЗТВ — зона термического влияния. АД — аргоно-дуговая.

Сплавы с повышенной жаропрочностью (например, ВН-2, ВН-2А, F-48, B-66, D-31), как правило, наиболее склонны к межкристаллитному разрушению при аргоно-дуговой и электроннолучевой сварке листового материала. Вакуумный отжиг сплавов ВН-2 и ВН-2А перед сваркой не оказывает заметного влияния на склонность сварных швов к растрескиванию. Растрескивание швов на тонколистовом материале (1,2—1,6 *мм*) возрастает при повышении скорости сварки с 20 до 70—80 *м/ч*, а также при увеличении размеров сварочной ванны.

Количество трещин в швах после сварки в камере с контролируемой атмосферой такое же, что и после сварки со струйной защитой аргоном. Газовый ана-

лиз сплава ВН-2 показал, что содержание азота в шве после сварки со струйной защитой практически не отличается от содержания его в основном металле (0,050 и 0,048% соответственно), т. е. струйная защита шва является достаточно надежной.

36. Режимы сварки и механические свойства сварных соединений ниобия и его сплавов с 6% W и 3% Ta. Аргоно-дуговая сварка вольфрамовым электродом в камере с предварительной откачкой до 10^{-4} *мм рт. ст.* [37] *

Материал	Режим сварки			Механические свойства					
				Сварное соединение		Основной металл			
						$\sigma_в$ в *кГ/мм²*		Число перегибов	
	Сила тока в *а*	Напряжение в *в*	Скорость сварки в *м/ч*	$\sigma_в$ в *кГ/мм²*	Среднее число перегибов**	вдоль проката	поперек проката	вдоль проката	поперек проката
Ниобий технический (0,02% O_2, 0,03% C, 0,03% N_2):									
лист 0,8 *мм* после прокатки со степенью деформации 95%	125	10	30	50,1	3,5	76	70	7	2,5
после отжига 1200° — 1 *ч* в вакууме 10^{-4} *тор*	170	10	50	49,7	7	55,8	43,4	15	13
	220	9	100	45,1	8,5	—	—	—	—
Сплав 6% W, 3% Ta, ост Nb. Лист 1 *мм* после прокатки со степенью деформации 95%	185	10	30	53,2***	3	77,5	65,8	4,5	3

* Сварку проводили при избыточном давлении аргона 0,1 *кГ/см²*.
** Угол загиба 180°.
*** Образец разрушился по шву, остальные — по зоне термического влияния.

При сварке пластин острофокусированным электронным лучом с образованием литой зоны шва малого сечения трещины в швах не образуются, при этом обнаружено рафинирование сварного соединения (содержание азота 0,031%). Однако при сварке расфокусированным лучом с образованием сечения шва такого же, как и при аргоно-дуговой сварке, в швах появлялись трещины. Это обстоятельство свидетельствует о важном значении концентрации температурного поля.

Молибден резко уменьшает сопротивляемость сплавов образованию горячих трещин. Что касается вольфрама, то сплав с 10% W (вес.) менее склонен к образованию горячих трещин, чем сплав с 5% W (вес.). Металлографический анализ показывает, что в сплавах системы Nb—W образуются границы сложной формы, приближающиеся по очертаниям к дендритам затвердевания, тогда как в сплавах системы Nb—Mo границы зерен остаются прямолинейными и практически не меняют своей формы.

Возможна стыковая (контактная) сварка оплавлением и сопротивлением, а также точечная и роликовая сварка без применения защитных газов. Однако при этом происходит приваривание электродов. Для устранения этого недостатка предложено [74] рабочую поверхность электродов покрывать металлами с высокой тепло- и электропроводностью и высокой температурой плавления, например родием, рением или никелем. На рабочую поверхность электрода гальваническим

способом наносят покрытие толщиной 5—10 *мкм* или в торец электрода запрессовывают цилиндрическую вставку из этих металлов диаметром 5 *мм*, высотой 6 *мм*, что существенно повышает стойкость электродов и обеспечивает качественную сварку сплавов ниобия.

Сплавы ниобия, а также тантала, титана и др. в виде прутков диаметром до 100 *мм* или труб диаметром до 200 *мм* с толщиной стенки 10 *мм* можно сваривать в однородных и разнородных сочетаниях трением. При этом обеспечивается высокая стабильность свойств сварных соединений [85].

Ниобий хорошо сваривается с ванадием (в качестве присадки применяют титан [11]), танталом, сплавами титана, меди, циркония. При сварке ниобия с никелевыми сплавами образуются трещины. Рекомендуется выполнять сварку с применением вставки, например, из палладия [56].

Тантал в компактном виде или в виде порошка обладает способностью поглощать газы — азот, водород, кислород, окись углерода и др. с образованием соответствующих соединений — нитридов, гидридов, окислов и карбидов. Рекомендуемые рабочие температуры танталового геттера 700—1200° С, температура нагрева для дегазации 1600—2000° С. Чистый тантал обладает отличной обрабатываемостью и тугоплавкостью, однако при высоких температурах его прочность относительно невелика.

Высокая пластичность тантала (так же как и ниобия) позволяет легировать его сравнительно большими количествами других элементов без существенного ухудшения технологичности сплава. Наиболее распространен сплав Та — 10% W [51]. Влияние содержания некоторых легирующих элементов на минимальный радиус загиба (до появления первой трещины) основного металла и сварных швов, полученных ручной дуговой сваркой вольфрамовым электродом в камере, заполненной аргоном, приведено в табл. 37 [26]. Толщина свариваемых листов составляла 0,6—0,9 *мм*.

37. Влияние содержания легирующих элементов на минимальный радиус загиба сплавов тантала

Система	Максимальное содержание в вес. % легирующих элементов для указанного минимального радиуса загиба при 20° С					
	2*T**		4*T**		8*T**	
	Основной металл	Шов	Основной металл	Шов	Основной металл	Шов
Та—Nb	$\geqslant$ 50	$\geqslant$ 50	$\geqslant$ 50	$\geqslant$ 50	$\geqslant$ 50	$\geqslant$ 50
Та—V	17,5	20	20	22	25	25
Та—Hf	30	5	$\leqslant$ 30	$\leqslant$ 10	$\leqslant$ 30	10
Та—Mo	7,5	$\leqslant$ 2,5	$\leqslant$ 10	2,5	12,5	$\leqslant$ 5
Та—W	15	$\leqslant$ 10	17	12,5	$\leqslant$ 20	$\leqslant$ 12,5
Та—Re	$\geqslant$ 5	$\leqslant$ 5	$\geqslant$ 5	$\leqslant$ 5	$\geqslant$ 5	$\leqslant$ 5
Та—Ru	2,5	$\leqslant$ 2,5	$\leqslant$ 5	$\leqslant$ 2,5	$\leqslant$ 5	2,5
Та—Os	$\geqslant$ 5	2,5	$\geqslant$ 5	$\leqslant$ 5	$\geqslant$ 5	$\leqslant$ 5
Та—C	$\geqslant$ 0,2	0,07	$\geqslant$ 0,2	$\geqslant$ 0,2	$\geqslant$ 0,2	$\geqslant$ 0,2

* *T* — толщина пластины.

Обращает на себя внимание высокое «допустимое» содержание ниобия и ванадия — аналогов тантала, при этом допустимое содержание ванадия в сварном шве даже выше, чем в основном металле. Интересно также отметить, что вольфрам в меньшей степени снижает пластичность тантала, чем молибден, допустимое содержание которого как в основном металле, так и в сварных соединениях ниже, чем вольфрама. Роль углерода оказывается существенной только при загибе сварных швов с малым радиусом.

Сравнение ручной, автоматической (аргоно-дуговой вольфрамовым электродом) и электронолучевой сварки семи двойных и тройных сплавов тантала с мо-

либденом и вольфрамом показало, что только при электронолучевой сварке сплава Та — 5% Mo существенно улучшилась пластичность при загибе, а при сварке Та — 10% W — 2,5% Mo (наименее пластичный сплав) пластичность даже ухудшилась по сравнению с ручной аргоно-дуговой сваркой. Порог хрупкости при загибе сварных образцов значительно более высокий (100—300°), чем основного металла (—150° и ниже). Прочность на разрыв образцов с продольным швом в состоянии после сварки на 15—40%, а пластичность на 30—95% ниже прочности и пластичности основного металла. Последующий отжиг при 1482° С (1 и 10 ч) и 1930° С (1 ч) увеличивал пластичность сварных образцов до уровня пластичности основного металла. Отжиг при 1930° С в течение 10 ч не приводил к улучшению пластичности сварных образцов.

Гафний (свыше 5%) и рутений в сплавах тантала приводят к растрескиванию сварных соединений. В сварных соединениях сплава Та—5% W—2,5% Re также наблюдали трещины, что свидетельствует об охрупчивающем действии рения.

Цилиндры из сплава Та — 10% W можно соединять со стальными трубами сваркой взрывом [82]. При этом конусный зазор обеспечивает образование соединения на большей поверхности, а при взрыве происходит деформация стальной трубы. В месте сварки образуются интерметаллические соединения тантала и железа. Наиболее важным фактором в образовании сварного соединения является угол сходимости соединяемых поверхностей или величина первоначального зазора. Полученные соединения обладают прочностью и пластичностью.

Хром. Решетку объемноцентрированного куба хром сохраняет вплоть до температуры плавления. Начиная с 800° С он активно взаимодействует с азотом, образуя нитриды. Упругость паров резко возрастает с температурой. По своей жаростойкости (1200° С) хром превосходит остальные тугоплавкие металлы. При 1100° С скорость окисления, измеренная по привесу, составляет 1,0 *мг/м²·ч*. Хром обладает высокой коррозионной стойкостью в окислительных средах и в расплавленных металлах. Наиболее распространены сплавы хрома, легированные ванадием (0,1—0,35%), титаном (0,1—2,60%), иттрием (0,3—1,0%), вольфрамом (до 1,5%), никелем (до 32%).

Сварка хрома плавлением затруднена ввиду его склонности к трещинообразованию [51]. Возможно проведение аргоно-дуговой сварки вольфрамовым электродом с применением присадочной проволоки из никелевых сплавов, а также сварко-пайки (без расплавления основного металла). Рекомендуется применять предварительный и сопутствующий подогрев. Прочность получаемых соединений зависит от прочности присадочного материала. Хром, плакированный сплавом ЭИ435, можно сваривать контактной точечной сваркой и аргоно-дуговой сваркой вольфрамовым электродом со струйной защитой с расплавлением плакированного слоя и применением присадочной проволоки из никелевых сплавов.

Молибден. Кристаллизуется в решетку объемноцентрированного куба и не претерпевает полиморфных превращений вплоть до температуры плавления. Окисление начинается при 400° С и свыше 600° С происходит интенсивно с образованием трехокиси молибдена с температурой плавления 795° С. Ввиду склонности к окислению молибден и его сплавы в окислительных средах при высоких температурах могут работать лишь с применением защитных покрытий. В среде очищенного азота молибден устойчив от температуры плавления до 1000° С. Нитриды молибдена диссоциируют при сравнительно низких температурах (до 1000° С). Молибден, как и вольфрам, инертен к водороду.

Молибден устойчив против воздействия многих кислот: соляной, фосфорной, серной и плавиковой, растворов щелочей и многих расплавленных металлов — натрия, калия, лития, галлия, свинца, висмута, ртути и меди. Растворяется молибден в азотной кислоте и расплавленных щелочах [51].

В основном промышленные сплавы легируют небольшими количествами (десятые доли процента) циркония, титана, ниобия, и тантала, образующих с молибденом в этих количествах твердые растворы.

Сварные соединения молибдена и его сплавов, полученные методами сварки плавлением (аргоно-дуговая, электронолучевая и др.), обладают пониженной

пластичностью при испытании на загиб при комнатной температуре, что объясняется высокой температурой перехода из пластичного в хрупкое состояние этого металла в литом и рекристаллизованном состояниях (около 150—200° С при статическом испытании на загиб).

Введение в молибден до 50% вес. рения приводит к значительному улучшению свариваемости сплава [47, 19]. Сварные образцы толщиной 1 *мм* после аргоно-дуговой сварки вольфрамовым электродом или электронолучевой сварки стабильно дают угол загиба 150°, имеют прочность, близкую к прочности основного металла и допускают холодную прокатку при степени обжатия 70% (за три прохода) без образования трещин. Использование рения или сплава Mo — 50% Re в качестве присадочного материала (проволока или вставка в виде фольги) при сварке молибденовых сплавов также позволяет значительно повысить пластичность их сварных швов.

Опытные режимы по электронолучевой сварке вне вакуума листового сплава TZM (0,5% Ti, 0,08% Zr; 0,02% C; остальное Mo) приведены в табл. 38. Листы находились в состоянии после отпуска для снятия напряжений [77].

38. Режимы электронолучевой сварки вне вакуума молибденового сплава TZM (ускоряющее напряжение 175 *кв*)

Толщина в *мм*	Ток луча в *ма*	Скорость сварки в *см/мин*	Атмосфера	Рабочее расстояние в *мм*
0,25	2,5	200	Гелий	9,3
2,5	40	110	Аргон	6,35
5,1	40	63	»	6,35

Пределы прочности и текучести сварных образцов при комнатной температуре составляли 50% от основного металла, а при 1200° С — 70%.

Возможно проведение стыковой сварки сопротивлением молибдена без специальной защиты, при этом выделяющиеся пары металла и окислов служат защитой. Между свариваемыми поверхностями иногда помещают промежуточную прокладку из титана [43] или других металлов.

При сварке плавлением молибдена с ниобием, вольфрамом, сталями и др. в сварных соединениях образуются трещины и сварные соединения весьма хрупкие.

Для повышения качества нахлесточных соединений молибденовых сплавов с другими металлами расплавлению подвергают только легкоплавкую компоненту соединения, при этом возможно использование промежуточной вставки из третьего металла, например меди [36] или никеля [57]. Несмотря на отсутствие взаимной растворимости молибдена и меди, между ними также возможно получение сварного соединения, равнопрочного с медью, если оплавлять медь на молибден [34].

Молибденовые пластины толщиной 0,5 *мм* соединяли с пластинами из ковара (Н29К18) толщиной 1 *мм* встык и внахлестку электронолучевой сварко-пайкой. Во избежание образования интерметаллических соединений рекомендуется применять сварку через прослойку из другого металла, не дающего интерметаллидов ни с молибденом, ни с легирующими элементами ковара (например, через прослойку из хрома или титана) [58].

Следует указать также на возможность аргоно-дуговой сварки вышеприведенных разнородных сочетаний [35].

Диффузионной сваркой в вакууме молибден или вольфрам можно сварить с медью только через промежуточный подслой из никеля [61]. Листы из вольфрама или молибдена толщиной 1,3 *мм*, а также стержни из указанных материалов диаметром 20—25 *мм* сваривали с медными листами толщиной 0,3—0,5 *мм*. Вольфрамовые и молибденовые пластины гальваническим способом покрывали слоем никеля толщиной 10—14 *мкм*, после чего производили диффузионную сварку в вакууме по режимам, указанным в табл. 39. Ширину диффузионной зоны (об-

ласть существования твердого раствора меди и никеля) определяли методом микротвердости.

39. Режимы диффузионной сварки вольфрама и молибдена с медью через поделой никеля толщиной 10—14 *мкм*

Соединяемые материалы	Температура сварки в °С	Давление в *кГ/мм²*	Время сварки в *мин*	Вакуум в *мм. рт. ст.*	Ширина зоны соединения в *мкм*	$\sigma_в$ в *кГ/мм²*
Молибден никелированный с медью	800	2,5	40	10^{-4}	14	11,1
	900	2,0	30	10^{-3}	15	12,2
	950	1,6	25	10^{-3}	21	15,1
Вольфрам никелированный с медью	800	2,2	40	10^{-4}	13	9,4
	900	2,0	30	10^{-3}	15	11,1
	950	1,6	25	10^{-3}	20	13,3

Как видно из табл. 39, оптимальный режим диффузионной сварки вольфрама и молибдена с медью через слой никеля: $t = 900 \div 950°$; $p = 1{,}6$ *кГ/мм²*; $\tau = 30$ *мин*; вакуум 10^{-3} *тор*.

Режимы диффузионной сварки молибдена ЦСДМ со сталью 1Х13 приведены в табл. 40 [25].

Вольфрам. Среди тугоплавких металлов вольфрам имеет самые высокие температуру плавления, модуль упругости и коэффициент теплопроводности. При получении вольфрама методом электролиза или восстановлением трехокиси вольфрама установлено существование β-фазы, которая ниже температуры полиморфного превращения, равной 630° С, переходит в α-модификацию с решеткой объемноцентрированного куба.

С азотом и водородом вольфрам не взаимодействует до температуры плавления, но вступает в реакцию с аммиаком с образованием двух нитридов W_2N и WN, которые разлагаются при 600—800° С. На воздухе вольфрам устойчив до 400° С. Вольфрам устойчив в соляной, серной и других кислотах при комнатной температуре, а также в расплавленных металлах: натрии до 900° С, ртути до 600° С, висмуте до 980° С [1].

40. Режимы диффузионной сварки молибдена ЦСДМ и стали 1Х13

Температура в °С	Время выдержки в *мин*	Удельное давление в *кГ/мм²*	$\sigma_в$ в *кГ/мм²*
900	15	1,5—2,0	25
1000	15—20	1,0—2,0	39—46
1100	До 10	До 1,5	30—40
1200	» 5	» 0,5	40

Основной целью легирования вольфрама является повышение его пластичности (технически чистый вольфрам при комнатной температуре имеет относительное удлинение около нуля), а также жаропрочности. Легирующими добавками служат рений, тантал, молибден, ниобий, цирконий, гафний, а также окись тория.

При аргоно-дуговой сварке вольфрам склонен к образованию трещин, рекомендуется подогрев до 500° С и проведение сварки без жесткого закрепления деталей [69]. Вакуумный отжиг при 1800° С в течение 1 *ч* несколько повышает пластичность сварных соединений, температура перехода в хрупкое состояние которых составляет 700° С.

Разработан новый порошковый вольфрам GE-15, при дуговой сварке которого пор и трещин не образуется [86]. В камере, заполненной аргоном, можно сваривать вольфрамовым электродом фольгу, листы и плиты толщиной 0,125—16 *мм*. При толщине деталей 1,5—3,2 *мм* следует точно выдерживать скорость сварки 7,5—9 *м/ч*. Первую откачку камеры проводят до давления 10^{-3} *тор*, далее заполняют ее аргоном, снова откачивают до $0{,}8 \cdot 10^{-3}$ *тор* и повторно

заполняют аргоном. Сварку проводят при непрерывной подаче инертного газа в горелку, поток которого охлаждает шов и удаляет вредные газы, выделяющиеся при сварке, что обеспечивает получение чистых по примесям внедрения швов. При сварке материала толщиной до 1,5 *мм* в горелку подают смесь 50% Ar + 50% He, при сварке более толстого материала — только гелий.

Как правило, дуговую сварку вольфрама ведут с предварительным, сопутствующим и последующим подогревом до 300—650° С [64]. При испытаниях образцов на загиб температура перехода в хрупкое состояние составляла около 600° С. Прочность сварных образцов несколько ниже прочности основного металла при температурах ниже 1650° С. Сварные соединения на плоских образцах вольфрама толщиной 3,18 *мм*, а также на цилиндрах (по образующей и опоясывающим швом), полученные электроннолучевой сваркой без предварительного нагрева, почти не содержат трещин, а по пластичности превосходят швы, полученные дуговой сваркой (плавящимся и неплавящимся электродами). Сварку проводили на низковольтной установке с небольшой скоростью, что позволило достаточно хорошо прогреть свариваемые детали, а при охлаждении в вакууме как бы создало условия отжига после сварки. Введение в расплавленный металл добавок молибдена и окислов титана и циркония способствовало измельчению зерна в структуре швов, однако значительного изменения свойств при этом не наблюдалось.

Разработан способ соединения тонких листов вольфрама при температурах ниже температуры рекристаллизации. По этому способу производят пайку вольфрама с последующей выдержкой при температуре пайки, при которой происходит взаимодиффузия, что приводит к образованию соединения с высокой температурой повторного расплавления (свыше 2760° С). Наиболее подходящим признан сплав-припой 50% Cr — 50% Ni. Пайку производили в вакууме при 1400° С без специальной подготовки листов. Выдержка при температуре пайки составляла 15—30 *мин*. Этим способом были успешно изготовлены сегментные горловинные вставки ракетных двигателей, которые были стойкими в течение 20 *сек* в газовом потоке реактивного двигателя при 3300° С [64].

Для сравнительно больших поверхностей соединяемых деталей перспективным является способ диффузионной сварки в вакууме [24]. Сварку молибдена и вольфрама проводили на образцах с площадью контакта 16×16, 14×14, 12×12 и 10×10 *мм*, сваривали также фольгу из тантала (табл. 41).

41. Оптимальные режимы диффузионной сварки тугоплавких металлов

Металл	Температура в °С	Давление в *кГ/мм²*	Время в *мин*
Молибден	1700	1,0	5
Вольфрам	2000	2,3	20
Тантал	1650	1,2	20
Вольфрам-сталь	1200	0,3	30

Металлографические исследования показали, что в зоне контакта изменений структуры и собирательной рекристаллизации не наблюдается, непровары отсутствуют. Этим методом сваривали составные катоды электровакуумных приборов из молибдена МЧ с вольфрамом ВА-4, ВЧ, ВТ-15, ВРИ.

Возможно соединение вольфрама химическим осаждением из газовой фазы [17,83] по реакции

$$WF_6\ (\text{газ}) + 3H_2\ (\text{газ}) \rightarrow$$
$$\rightarrow W_{тв} + 6HF\ (\text{газ}).$$

Пластины вольфрама 25×6×0,5 *мм* соединяли встык. Наилучшее качество соединения получается при использовании V-образной разделки кромок с углом скоса 120°. Оптимальная температура осаждения 650° С. По структуре и прочности металл шва не отличается от основного металла.

Сварные соединения вольфрама с другими тугоплавкими металлами (V, Nb, Ta, Mo), полученные аргоно-дуговой сваркой, характеризуются весьма высокими температурами хладноломкости (как правило, более 700°) [30].

ЛИТЕРАТУРА

1. Агте К., Вацек И. Вольфрам и молибден. М., Энергия, 1964.
2. Андреева В. В., Казарин В. И. Новые конструкционные химически стойкие металлические материалы. М., Госхимиздат, 1961.
3. Афанасьев П. В. Диффузионная сварка титана с титаном, никелем и медью. «Сварочное производство», 1968, № 1.
4. Галицкий Б. А. Титан и его сплавы в химическом машиностроении. М., Машгиз, 1968.
5. Гафний. Перевод с англ. М., Металлургия, 1967.
6. Герцик В. В. Области применения молибдена. В сб. «Молибден», ИЛ, 1962.
7. Глазунов С. Г. Современные титановые сплавы, «Металловедение и термическая обработка металлов», 1963, № 2.
8. Головченко В. С., Николаев К. Г. Полуавтоматическая аргоно-дуговая сварка титановых сплавов. «Автоматическая сварка», 1968, № 2.
9. Головченко В. С. Влияние режимов сварки плавящимся электродом в инертных газах на размеры швов. «Автоматическая сварка», 1967, № 8.
10. Гонсеровский Ф. Г., Авторское свидетельство СССР № 206759.
11. Гонсеровский Ф. Г., Шерман В. И. Авторское свидетельство СССР № 179855.
12. Горячев А. И., Зеленин В. А. Механизированная сварка неплавящимся электродом углубленной дугой, «Автоматическая сварка», 1964, № 2.
13. Гуревич С. М. Некоторые особенности сварки титана под флюсом «Автоматическая сварка», 1957, № 5.
14. Гуревич С. М., Дидковский В. И. Некоторые вопросы электрошлаковой сварки титана, «Автоматическая сварка», 1957, № 3.
15. Гуревич С. М., Загребенюк С. Д. Полуавтоматическая сварка титана под флюсом. «Автоматическая сварка», 1961, № 7.
16. Гуревич С. М. и др. Сварка сплавов ванадия «Автоматическая сварка», 1968, № 5.
17. Дискинд М. Дж. Сб. «Производство изделий из тугоплавких металлов», М., «Мир», 1968.
18. Дидковский В. И. Электрошлаковая сварка титана большой толщины плавящимся мундштуком, «Автоматическая сварка», 1961, № 5.
19. Дьяченко В. В. и др. «Сварочное производство», 1962, № 7, стр. 1—4.
20. Дьяченко В. В. и др. В сб. «Надежность сварных соединений и конструкций», М., «Машиностроение», 1967, стр. 113—124.
21. Евсеев Г. Б., Тихомиров А. В. Исследование ацетилено-кислородной резки титановых сплавов. Стеклов О. И. Влияние газовой резки на свойства сварных соединений технического титана, «Сварочное производство», 1965, № 6.
22. Еременко В. Н. Титан и его сплавы, Киев Изд-во АН УССР, 1960, Многокомпонентные сплавы титана, Киев, Изд-во АН УССР, 1962.
23. Каганович С. Я. Цирконий и гафний. М., АН СССР. 1962.
24. Казаков Н. Ф. Диффузионная сварка в вакууме. М., «Машиностроение», 1968.
25. Казаков Н. Ф., Капралов Б. П., Сигачев А. П. Сб. Диффузионное соединение в вакууме металлов, сплавов и неметаллических материалов. ч. 1. М., «Наука», 1968, стр. 94—112.
26. Каммер П. А. и др. Сб. «Производство изделий из тугоплавких металлов». Пер. с англ., М., «Мир», 1968.
27. Клейн Р. В сб. «Электронно- и ионнолучевая технология», М., Металлургия, 1968.
28. Компан Я. Ю., Гуревич С. М. Электрошлаковая сварка титана проволочными электродами. «Автоматическая сварка», 1968, № 9.
29. Корнилов И. И. Основные типы диаграмм состояния на основе титана ДАН СССР, т. 91, 1953, № 3.
30. Кофлин С. А. Сб. «Производство изделий из тугоплавких металлов», М., «Мир», 1968, стр. 279—289.
31. Куликов Ф. К., Замков В. П. Применение бескислородных флюсов при сварке плавлением титановых сплавов, «Автоматическая сварка», 1968, № 4.
32. Куркин С. А., Гуань Цяо. Снятие остаточных сварочных напряжений в тонкостенных элементах из титановых сплавов. «Справочное производство», 1962, № 10.
33. Лебедев К. Б. Рений. М., Металлургиздат, 1963.
34. Левтонов И. П., Стомахин Я. И. Труды ЦНИИТМАШ, 1969.
35. Левтонов И. П., Любавский К. В., Труды ЦНИИТМАШ, 1969.
36. Любавский К. В., Левтонов И. П., Стомахин Я. И. Авторское свидетельство СССР № 219717.
37. Мальцев М. В., Байков А. И., Соловьев В. Я. Технология производства ниобия и его сплавов. М. «Металлургия», 1966.
38. Мальцев М. В. и др. Сб. «Механизм пластической деформации металлов». «Наукова думка», Киев, 1965.
39. Молибден Сб. Перевод с английского, М., ИЛ, 1962.

40. Мороз Л. С., и др. Титан и его сплавы. Т. 1. Л. Судпромгиз. 1960.
41. Назаренко О. К., Истомин Е. И., Локшин В. Е. Электронно-лучевая сварка. М., 1966.
42. Ниобий, тантал и их сплавы. Сб. М. «Металлургия», 1966.
43. Овчинников С. Е. и др. Авторское свидетельство СССР, № 210962.
44. Поляков Д. А. Аргоно-дуговая сварка сплавов титана. Передовой научно-технический и производственный опыт № 4—63—44/29 ГОСИНТИ, 1963.
45. Поплавко М. В. и др. Сварка титановых сплавов. Сб. «Сварка цветных металлов и сплавов», М., Оборонгиз, 1961.
46. Савицкий Е. М., Бурханов Г. С. Металловедение тугоплавких металлов и сплавов, М., «Наука», 1967.
47. Савицкий Е. М., Тылкина М. А., Поварова К. Б. Сплавы рения. «Металлургия», М., 1965.
48. Семчишен М. В сб. «Молибден» М., ИЛ. 1962.
49. Справочник по сварке. т. 2, М., Машгиз, 1961.
50. Справочник по редким металлам. Пер. с англ. Под ред. В. Е. Плющева М., «Мир», 1965.
51. Тугоплавкие материалы в машиностроении. Справочник. Под ред. А. Т. Туманова и К. И. Портного. М., «Машиностроение», 1967.
52. Стеклов О. И. Влияние водорода в процессе коррозии на свойства сварных соединений титана, «Сварочное производство», 1967, № 2.
53. Стеклов О. И. Стойкость сварных соединений титана против коррозионного растрескивания и межкристаллитной коррозии. Технология химического и нефтяного машиностроения». ЦИНТИХИМнефтемаш, 1965, № 3.
54. Стеклов О. И., Храмогин Ю. Ф. Защита стыков при сварке труб из титана и его сплавов. Аргоно-дуговая сварка труб из титана. «Монтажные и специальные строительные работы», 1968, № 2, № 10.
55. Стрижевская Л. Г. и Старова Л. Л. «Сварочное производство» 1966, № 1.
56. Стрижевская Л. Г. и др. Авторское свидетельство СССР № 160553.
57. Теребихин Г. В. Труды ЛПИ № 283, 1967.
58. Теребихин Г. В. Сб. «Сварка цветных металлов и сплавов», М., 1968.
59. Третьяков Ф. Е. Сварка плавлением титана и его сплавов. М., «Машиностроение», 1967.
60. Трефилов В. И. Сб. «Физическая природа хрупкого разрушения», Киев, «Наукова думка». 1965.
61. Ушакова С. Е., Рожкова А. А. «Автоматическая сварка», 1968, № 6, стр. 73—74.
62. Франк. Сб. «Тугоплавкие металлы и сплавы», М., «Металлургия», 1965, стр. 112.
63. Фролов В. В. Процессы термодиффузии и десорбции водорода в гидрообразующих металлах при сварке плавлением. Сб. МВТУ, 106, «Сварка цветных металлов и некоторых легированных сплавов». М., Оборонгиз, 1962.
64. Хикокс Дж. К. и др. Сб. «Производство изделий из тугоплавких металлов», М., «Мир», 1968, стр. 323—330.
65. Чернышова Т. А., Шоршоров М. Х. Горячие трещины в сварных соединениях тугоплавких металлов. ЛДНТП, Л., 1968.
66. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов. М., Физматгиз, 1959.
67. Шварц Г. Л. и др. Таблицы коррозионной стойкости титана и его сплавов в различных агрессивных средах. М. НИИХИММАШ, 1961.
68. Шоршоров М. Х. Металловедение сварки стали и сплавов титана. М. «Наука», 1965.
69. Штейн Р. О. Аргоно-дуговая сварка вольфрама, «Автоматическая сварка», № 7, 1962.
70. Ягупольская Л. И., Гуревич С. М. Коррозия сварных соединений титановых сплавов в минеральных кислотах, «Автоматическая сварка», 1960, № 11.
71. Ямпольский В. М. Повышение пластических показателей металла шва при дуговой сварке в вакууме плавящимся электродом титановых сплавов. Сб. «Надежность сварных конструкций», М., «Машиностроение», 1967.
72. Патент США № 3372463.
73. Патент США № 3323203.
74. Патент США № 3363086.
75. Японский патент № 24982.
76. Японский патент № 24979.
77. Duhamel R. F., Weld J., 44, 6, 1965, 465—74.
78. Churchman A. T., F. Inst. Metals. 1960, № 1, 221.
79. Hahn G. T., Gilbert A., Jaffee., R. P., Proc, Refact. Met. Symp. Chicago, Apr., 1962, 23.
80. Horacek, Wladimir «Zwaranie», 1968, 17, № 1, 22—25.
81. Hull W. G. Fusion Welding of titanium and its alloys «Weld und Metal Fabric», 1961, 29 № 1, 3, 6.
82. Lieberman E., Kennedy J. R., Weld J., 1967, 46, No11, S.509—15.
83. Locke S. R., Vacuum, 1969, 19, 4, 179—186.
84. Shueler A. W., «Weld J.», 1968, 47, No 8, 638 —64.
85. And.-Anz., 1968, 90, Sondernummer «Fachdokum. Fortschr.», 69.
86. Weld. Des. Fabric., 1967, 40, No 9, 70.
87. The metallurgy of hafinium. Ed. D. E. Tomas, E. T. Hayes. N. X. 1966.

ГЛАВА XIII

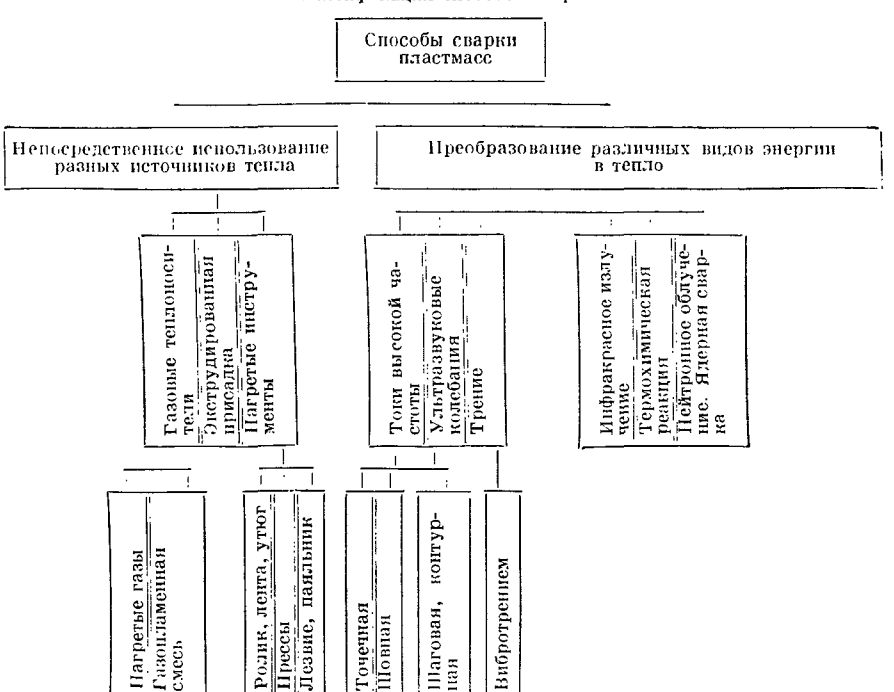
СВАРКА ПЛАСТМАСС

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СВАРИВАЕМОСТИ

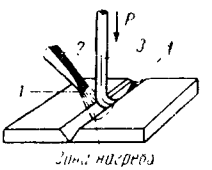
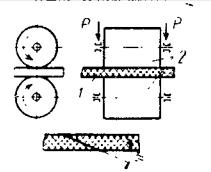
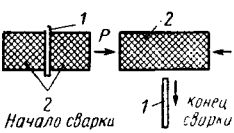
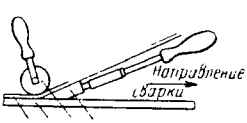
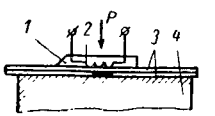
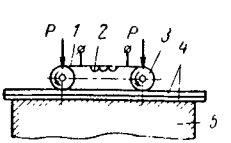
По сравнению с другими способами соединения пластмасс (клепкой и склейкой) сварка имеет ряд существенных преимуществ. Важнейшими из них являются: высокая производительность, малая трудоемкость, бо́льшая прочность и плотность соединений, экономия материала, лучшие условия труда. При сварке требуются меньшие производственные площади, чем при склейке. Благодаря указанным преимуществам сварка пластмасс широко распространена в разных отраслях промышленности. Наиболее широко применяется сварка пленочного материала.

Классификация способов сварки пластмасс приведена ниже, а схемы и описания даны в табл. 1.

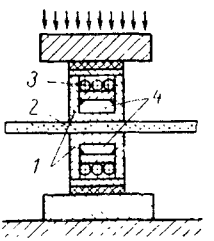
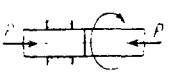
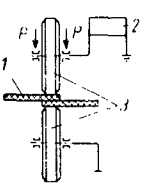
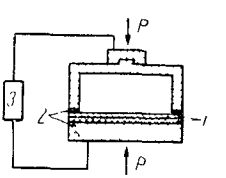
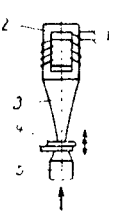
Классификация способов сварки



1. Схемы способов сварки

Вид сварки	Способ сварки	Сущность способа	Схема
Газовыми теплоносителями	Ручная с присадочным прутком	Нагретый газ (воздух, инертный газ и др.) *1* поступает из мундштука горелки *2* и нагревает кромки и пруток *3*. При нагреве свариваемые поверхности доводятся до вязко-текучего состояния. При надавливании рукой на пруток последний приваривается к размягченным кромкам, образуя сварной шов *4*	
	Беспрутковая	Перед сваркой кромки листов скашивают на «ус», листы *1* укладывают под сварку и кромки равномерно нагревают подогретым газом. Непосредственно за струей нагретого газа следуют холодные ролики *2*, обжимающие стык	
Нагретыми элементами (контактная)	Горячим лезвием	Теплоноситель – нагретая металлическая пластина («лезвие») *1*, которую помещают между свариваемыми поверхностями *2*. После того как тепло от пластины размягчит эти поверхности, пластину («лезвие») быстро удаляют, а поверхности сдавливают. Этим методом сваривают встык или внахлестку одновременно всю поверхность соединения	
	Паяльником	Нагретый паяльник *1* помещают между свариваемыми плоскостями и по мере размягчения кромок перемещают вдоль линии сварки. При нажатии роликом *2* на верхнюю полосу *4* она приваривается к листу *3*. Метод применяют при сварке эластичных материалов	
	Нагретым утюгом	Сварочный инструмент *1* (утюг), нагреваемый электронагревателем *2*, перемещаясь по свариваемым внахлестку пленкам *3*, нагревает их до температуры сварки и своим весом *P* сжимает свариваемые кромки. При сварке пленки укладывают на конфекционный стол *4*	
	Нагретой лентой	Лента *1*, свариваемая электронагревателем *2*, перемещается роликами *3* и одновременно прижимается ими усилием *P* к свариваемым внахлестку пленкам *4*, которые уложены на конфекционном столе *5*. Движение пленки под роликами может осуществляться либо в результате перемещения сварочного устройства, либо при движении конфекционного стола	

Продолжение табл. 1

Вид сварки	Способ сварки	Сущность способа	Схема
Нагретыми элементом (контактная)	Горячим прессованием	Тепло передается к месту сварки нагретыми поверхностями специальных прессов. Свариваемые поверхности пластмасс *2*, скошенные на «ус», зажимают в прессе *1*, рабочие поверхности которого нагревают электронагревателем *3*. Когда температура достигнет заданной, производят выдержку под давлением. В это время пресс охлаждают водой, проходящей по каналам *4*. В прессах можно осуществить и стыковую сварку	
Сварка трением	—	Нагревают детали теплом, которое выделяется при трении свариваемых поверхностей в результате приложенного к ним давления	
Токами высокой частоты	Роликовая (шовная)	Ролики *3* являются одновременно электродами, подводящими ток высокой частоты от генератора *2*. Свариваемые листы *1* сдавливают роликами и перемещают при вращении последних. Под роликами образуется шовное соединение	
	Прессовая (шовная, контурная)	Сваривают изделия *1* в прессе, контактные поверхности которого являются электродами *2*, подключенными к высокочастотному генератору *3*	
Ультразвуком	Точечная сварка	*2* — вибратор с обмоткой *1*, концентратор *3*, свариваемое изделие *4*, опора *5*	

При соединении полимеров под воздействием температуры и давления происходит процесс самослипания. При сварке в области контакта должно произойти восстановление структуры вещества, характерное для всего объема. Согласно точки зрения некоторых исследователей сваривание жестких термопластичных полимеров происходит главным образом за счет диффузии частей молекулярных цепей из одного объема полимера в другой, в результате чего продиффундировавшие макромолекулы как бы сшивают оба объема полимера и обеспечивают возникновение между ними прочной связи. Процесс сварки пластмасс может происходить лишь при определенных условиях. Основными из этих условий являются: повышенная температура в месте сварки, величина которой должна достигать температуры вязко-текучего состояния, наличие плотного контакта свариваемых поверхностей и определенное время протекания процесса.

По свариваемости пластмассы можно разделить на две группы:

1. Термореактивные — не свариваемые широко известными тепловыми методами. Изделия из них получают в готовом виде, соединяют механическим способом, склеиванием либо химической сваркой [5].

2. Термопластичные — способные свариваться (полиэтилен, полипропилен, полистирол, поливинилхлорид, полиамиды, полиакрилат, поликарбонат и др.). Они обычно выпускаются в виде полуфабрикатов (листов, стержней, профилей, труб), которые затем подвергают гибке, штамповке, сварке. При нагреве большинство термопластов постепенно переходит в высокоэластичное, затем в пластичное и далее в вязко-текучее состояние. Дальнейшее повышение температуры вызывает разложение пластмассы. Процесс сварки происходит в узких температурных границах, соответствующих вязко-текучему состоянию. При любом виде сварки надо стремиться, чтобы в зоне сварки пластмасса не достигала температуры разложения. Поскольку пластмассы малотеплопроводны, то при некоторых способах сварки только тонкий поверхностный слой достигает вязко-текучего состояния. Легче свариваются те термопластичные материалы, которые имеют более широкий диапазон температуры вязко-текучего состояния.

Пластмассы обладают высоким коэффициентом температурного расширения (в несколько раз большим, чем металлы). Поэтому в сварном шве возникают собственные напряжения, которые могут снижать прочность сварных соединений.

Выбор способа сварки зависит от свойств пластмассы, толщины материала, серийности выпуска изделий, типа конструкций, предъявляемых к ним требований и т. д.

СВАРКА ГАЗОВЫМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

При сварке газовыми теплоносителями нагрев кромок осуществляется подогретыми газами (воздухом, азотом, аргоном и др.) либо непосредственно продуктами сгорания горючего газа (ацетилена, водорода и др.) в воздухе. Впервые сварка пластмасс была осуществлена при помощи нагретого воздуха. Этот метод известен уже много лет и являлся наиболее распространенным.

Сварка с присадочным прутком. Метод подобен ручной газовой сварке металлов. При сварке соединений встык применяют различные типы разделок кромок (табл. 2). Во всех случаях разделка делается без притупления, с зазором.

При сварке газовыми теплоносителями относительно толстого материала наиболее рациональны стыковые соединения. Соединения внахлестку, тавровые и угловые применяют также широко, однако они менее рациональны.

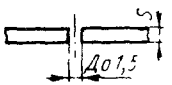
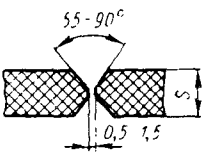
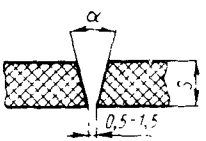
Практика показала, что прочность Х-образных швов выше, чем V-образных, причем с увеличением угла разделки прочность возрастает (табл. 3) за счет лучшего провара корня шва, однако скорость сварки уменьшается.

Нахлесточные швы применяют с односторонним или двусторонним проваром. Они обладают прочностью почти в 5 раз меньшей, чем стыковые соединения.

Прочность соединений при сварке пластмасс в значительной степени зависит от состояния поверхности свариваемого материала и присадочных прутков.

Поверхность кромок должна быть тщательно очищена от загрязнений и обезжирена (например, ацетоном).

2. Подготовка кромок при сварке стыковых соединений пластмасс

Эскиз	Основные размеры	Эскиз	Основные размеры
Без разделки кромок 	$s < 2$ мм	X-образная разделка кромок 	$s > 5$ мм; при $s < 6$ мм $\alpha = 55 \div 60°$; при $s > 6$ мм $\alpha = 70 \div 90°$
V-образная разделка кромок 	$s = 2 \div 6$ мм, $\alpha = 55 \div 60°$; при $s > 6$ мм $\alpha = 70 \div 90°$		

Присадочные прутки изготовляют из того же материала, что и свариваемые изделия, но несколько более пластифицированного (8,5% пластификатора), чтобы снизить температуру размягчения. Сварочные винипластовые прутки выпускают согласно ВТУ ГХП 90-48 диаметром 2, 3 и 4 *мм* с допуском по диаметру ±0,5 *мм*.

Диаметр прутка выбирают в зависимости от толщины свариваемых листов, формы разделки кромок и требуемой прочности. Установлено, что при сварке больших толщин лучшие результаты получаются при прутках диаметром 3,5 *мм*. Сварка с прутками диаметром более 3,5 *мм* приводит к снижению прочности шва. Однако провар корня шва рекомендуется производить прутком диаметром 2—2,5 *мм*.

3. Влияние угла раскрытия кромок на прочность сварного соединения винипласта

Угол раскрытия кромок в *град*	Предел прочности при растяжении в *кГ/см²*	
	X-образная разделка	V-образная разделка
45	280 ± 29	100 ± 12
60	295 ± 26	240 ± 19
75	345 ± 25	245 ± 15
90	400 ± 23	250 ± 13

Дальнейшим развитием метода прутковой сварки является сварка с прутком, нагретым до вязко-текучего состояния. Нагрев прутка осуществляется в специальном электрическом подогревателе (экструдере). При этом кромки свариваемых листов нагреваются за счет тепла присадочного материала без применения газовых теплоносителей. Предлагается использовать пруток специального профиля в форме 8, или как бы сдвоенного прутка. Это позволяет повысить производительность в 2 раза, сохранив при этом высокую прочность сварных соединений.

Методам прутковой сварки с нагревом газовыми теплоносителями присущи следующие основные недостатки:

1) низкая прочность и пластичность сварного соединения;

2) низкая производительность, особенно при сварке больших толщин;

3) зависимость качества сварки от индивидуальных особенностей сварщика, что вызывает иногда колебания прочности в пределах 30—70% для одного изделия;

4) утомляемость сварщика (необходимо строгое соблюдение перпендикулярного положения прутка и создание давления порядка 5 *кГ*);

5) возможность перегрева материала при сварке;
6) потеря прозрачности оргстекла в месте сварки.

Беспрутковая сварка. Ее применение позволяет значительно увеличить производительность процесса и повысить механические свойства сварных соединений. Принцип беспрутковой сварки основан на свойстве пластмасс соединяться в разогретом состоянии при определенном давлении. Этот метод позволяет получать скорость сварки 12—20 *м/ч*.

Прочность сварных соединений достигает 80—90% от прочности основного материала, при этом ударная вязкость материала не снижается. При беспрутковой сварке требуется тщательная подготовка и подгонка кромок. Кроме того, освоена она для соединения только листового материала.

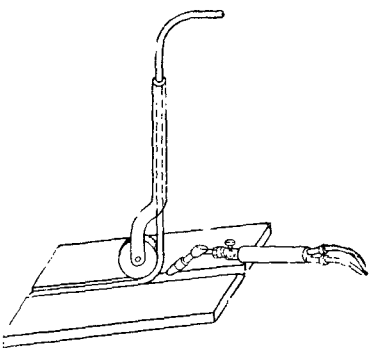


Рис. 1. Приспособление для прутковой сварки

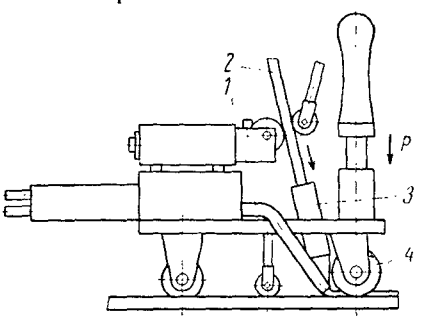


Рис. 2. Схема полуавтоматической сварки пластмасс газовыми теплоносителями: *1* — наконечник сварочной горелки; *2* — присадочный пруток; *3* — электронагреватель прутка; *4* — обжимающий ролик

Оборудование сварочных постов зависит от используемого газа-теплоносителя и источников его нагрева. При сварке газовыми теплоносителями применяются электрические или газовые горелки.

В электрических горелках воздух или другой газ (азот, аргон, углекислый газ) нагревается спиралями, расположенными в керамических блоках; при таких конструкциях кожух сильно разогревается. Для уменьшения нагрева кожуха применяют секционные горелки, в которых газ сначала проходит с наружной стороны секции кожуха и затем поступает в центральную его часть. Горелка с трубчатым нагретым змеевиком из нержавеющей стали является более долговечной. Температуру воздуха регулируют, изменяя скорость подачи его или сопротивление цепи электрического подогревателя.

Электрические горелки просты в изготовлении, отсутствие открытого пламени позволяет вести работы в помещениях, содержащих легко воспламеняющиеся вещества. Недостатком их является наличие нагревательной камеры, которая утяжеляет горелку, увеличивает ее габариты и делает неудобной при работе в труднодоступных местах. Кроме того, электрические горелки недолговечны.

При сварке электрической горелкой оборудование сварочного поста состоит из горелки, компрессора или воздуходувки с маслоуловителем, источника питания электрическим током и реостата. Сжатый воздух (или другой газ) можно получать из баллона.

В газовых горелках возможен прямой и косвенный нагрев сжатого воздуха. При прямом нагреве воздух нагревается непосредственным действием пламени горелки и смешивается с продуктами сгорания. Косвенный нагрев воздуха осуществляется за счет сгорания горючего газа (водорода, светильного газа, ацетилена и др.), при этом образующееся пламя нагревает змеевик, по которому подается сжатый воздух или другой газ.

Газовые горелки более производительны (по сравнению с электрическими), легче их и более долговечны. Срок службы газовых горелок при ежедневной семичасовой работе составляет 1.5—2 года. Недостатком газовых горелок является огне- и взрывоопасность применяемых газов. Это усложняет производство сварки на месте монтажа.

Простейшее приспособление для прутковой сварки полиэтилена изображено на рис. 1. Схема полуавтоматической установки представлена на рис. 2.

Для беспрутковой сварки полиэтиленовых пленок толщиной 25—100 *мк* применяют полуавтомат МСП-2, который позволяет сваривать внахлестку прямолинейные и криволинейные (с большим радиусом кривизны) швы. Машина установлена на направляющей и движется вдоль конфекционного стола по свариваемому материалу. Обогрев осуществляется газом-теплоносителем от многосопельной электрической горелки, имеющей 18 отверстий, расположенных по одной линии. Ведущий и ведомый ролики, создающие давление, охватываются двумя стальными лентами, зазор между лентами определяет ширину сварного шва.

Техническая характеристика машины МСП-2

Способ сварки	Нагретым воздухом или газом
Процесс сварки	Непрерывный
Ширина сварного шва в *мм*	3
Расход газа в *л/ч*	2500—3000
Температура нагрева газа в °С	300
Максимальное усилие сжатия пленки в *кГ/см²*	До 6
Скорость сварки в *м/мин*	До 6
Общая мощность машины в *квт*	2,1
Напряжение питающей сети в *в*	220
Габаритные размеры машины в *мм*	1030×750×1030
Вес машины в *кг*	73

Метод сварки экструдированной присадкой основан на подаче в место сварки разогретой присадки, получаемой из гранул, нагреваемых до вязко-текучего состояния в шнековом устройстве. За счет тепла нагретого экструдированного присадочного материала происходит размягчение кромок свариваемой пластмассы, которая прочно соединяется с присадкой. Этот метод напоминает сварку нагретым воздухом с присадкой. Метод находится в стадии разработки, он показал хорошие результаты при сварке пленок полиэтилена больших толщин.

Технология сварки каждого вида материала разрабатывается экспериментально. В зависимости от свариваемого материала выбирают газ-теплоноситель. Некоторые пластмассы чувствительны к кислороду, который снижает прочность и пластичность сварных швов. Поэтому в некоторых случаях сварку выполняют инертным газом или азотом. Например, полиэтилен рекомендуется нагревать азотом или углекислым газом. Однако он хорошо сваривается и при использовании горелок с прямым газовым нагревом. Нагретыми газами чаще всего сваривают винипласт, полистирол и др.

Винипласт не имеет определенной точки плавления. При температуре выше 80° С он размягчается, а при 180° С начинает течь. В интервале температур 200—220° С он переходит в вязко-текучее состояние. При этой температуре он сваривается при приложении давления. Температура сварки находится вблизи критической точки, при которой начинается разложение (деструкция) материала.

Очень важное значение имеет квалификация сварщика. Только при большом опыте и умении подбирать наилучшие условия сварки он может добиться хороших результатов. Для достижения в месте сварки температуры 200—220° С воздух в горелке следует нагревать до 230—270° С (табл. 4).

При выполнении сварки начинающим сварщиком температуру воздуха рекомендуется поддерживать около 230° С.

Выбор сменного наконечника для сварки зависит от ряда факторов: толщины свариваемых листов, диаметра сварочного прутка, формы разделки кромок.

Наконечники с отверстием малого диаметра (1,5—2,0 *мм*) применяют для сварки листов толщиной до 3,5 *мм*, а с отверстиями диаметром 3,5—4,0 *мм* — для листов толщиной 16—20 *мм*. Диаметр отверстия наконечника горелки должен быть равен диаметру сварочного прутка. Если диаметр отверстия меньше или больше диаметра прутка, трудно достигнуть достаточно равномерного прогрева последнего, вследствие чего прочность шва снижается.

4. Влияние температуры воздуха на скорость сварки и прочность сварного соединения винипласта

Температура нагреваемого воздуха в °С	Скорость сварки однорядного шва в *м/ч*	Предел прочности на разрыв Х-образного шва в *кГ/см²*	Прочность соединения по отношению к основному материалу в %
210	4,8	140	25
230	8,4	340	25
250	11,4	325	58
270	13,8	350	63
300	15,0	170	30
320	Разложение материала		

Примечание. Сварка производилась горелкой косвенного нагрева. Давление воздуха 0,6 *кГ/см²*, диаметр сопла и прутка 2,5 *мм*.

Скорость разогрева сварочного прутка и кромок листа воздухом зависит от профиля сварного шва. Так, например, при выполнении V- и Х-образных швов тепловые потери при сварке меньше, чем при швах угловых и внахлестку. Поэтому при одинаковой толщине листа следует применять соответственно наконечники меньших или больших диаметров.

В табл. 5—6 приведены некоторые данные, которые позволяют выбрать режимы сварки винипластовых листов и труб при разных типах соединений.

5. Технологические и прочностные данные по сварке стыковых соединений

Толщина листа или диаметр трубы в *мм*	Диаметр в *мм*		Угол разделки кромок α°	Зазор в корне шва в *мм*	Число уложенных прутков	Расход прутков на 1 *м* шва в *г*	Прочность по отношению к основному материалу в %
	прутка	отверстия наконечника					
V-образная разделка кромок							
3—5	2,6	2,5	55—60	0,5—1,0	8—10	60—75	75
7—10	3,3	3,0	60—65	1,0—1,2	10—14	100—140	75
12—15	3,0	3,0	70	1,0—1,5	20—28	200—280	75
17—20	3,5	4,0	75—90	1,5	32—42	495—6,90	75
Труба ⌀ 52/63	3,0	3,0	75—90	—	8—14	16—28	65*
Труба ⌀ 77/88	3,0	3,0	75—90	—	12—18	35—45	65*
Х-образная разделка кромок							
3—5	2,6	2,5	45—50	—	6—8	45—60	83
7—10	2,6	2,5	50	—	8—12	60—90	85
12—15	3,0	3,0	55—60	—	16—22	160—220	85
17—20	3,0	3,0	60—70	—	24—35	240—350	85

* При Х-образной подготовке 75%.

Полиметилметакрилат (органическое стекло свариваю струей нагретого воздуха при 200—220° С. Время нагрева более продолжительное, чем у винипласта, поэтому скорость сварки почти в 2 раза

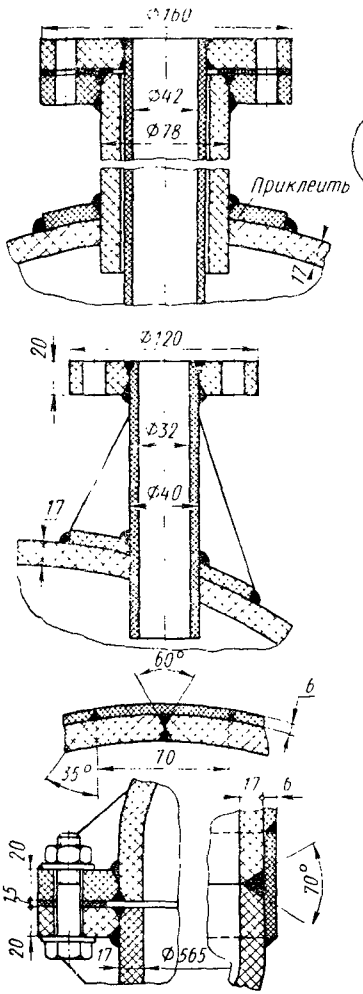


Рис. 3. Сварные узлы реактора из винипласта

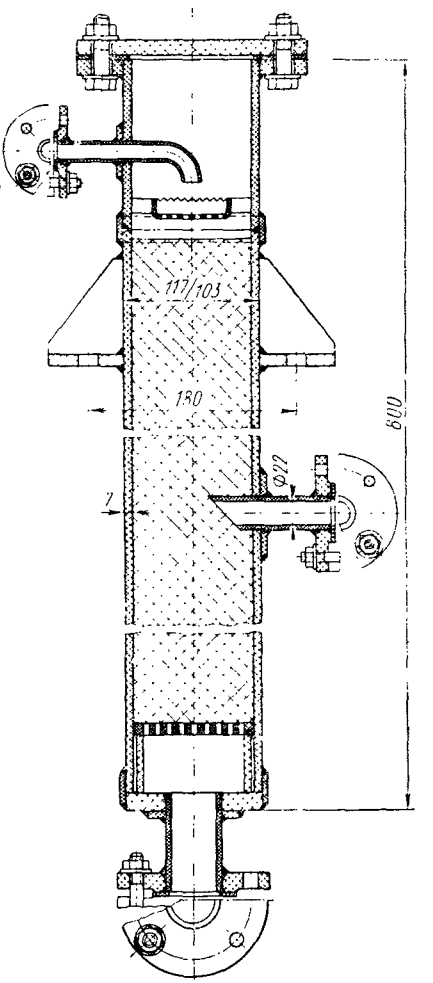


Рис. 4. Конденсатор-смеситель

ниже. В качестве присадочного материала применяют нарезанные из листа прутки сечением 7—12 *мм*². Более успешно осуществляется сварка с применением винипластовых прутков, которые лучше сцепляются с поверхностью стекла. Свариваемые поверхности рекомендуется предварительно протирать растворителем (ацетоном или дихлорэтаном). Прочность на разрыв сварных соединений составляет в среднем 30—45% от прочности основного материала.

6. Технологические и прочностные данные по сварке нахлесточных соединений листов и труб из винипласта

Толщина листа или диаметр трубы в мм	Диаметр в мм		Число уложенных прутков	Расход прутков на 1 м в г	Прочность по отношению к основному материалу в %
	прутка	наконечника			
3—5	2,6	2,8	4—10	30—75	50—60
7—15	3,0	3,0	16—22	160—220	50—60
12—15	3,0	3,0	26—34	260—340	50—60
17—20	3,5	3,8	36—48	343—740	50—65
Труба ⌀ 52/63	3,0	3,0	9—12	18—24	55—65
Труба ⌀ 74/88	3,0	3,2	16—20	40—60	55—65

Полиамиды следует сваривать в азоте, нагретом на 30—50° С выше температуры плавления основного материала. Полиэтилен сваривают в азоте, имеющем температуру 200—220° С.

Методом сварки газовыми теплоносителями изготовляют большой ассортимент сварных изделий (трубопроводы, вентиляционные системы, химическая аппаратура и др.) (рис. 3, 4).

СВАРКА НАГРЕТЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Сварка горячим «лезвием» и паяльником. При сварке горячим «лезвием» для исключения охлаждения разогретых поверхностей время с момента удаления нагревателя до сдавливания поверхностей должно быть минимальным. На рис. 5, 6 представлены зависимости прочности стыковых соединений стекла СОЛ, СТ-1 и винипласта, выполненных горячим «лезвием», от давления и температуры сварки.

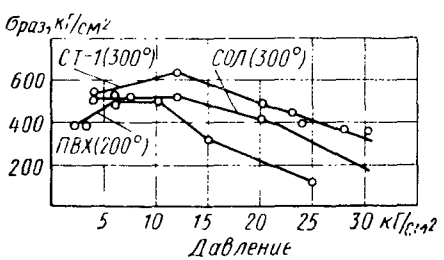


Рис. 5. Зависимость прочности стыковых соединений СОЛ, СТ-1 и ПВХ, сваренных горячим «лезвием», от давления. Температура сварки стекол СОЛ и СТ-1 — 300° С, ПВХ — 220° С

Эластичные при обычных температурах материалы сваривают горячим паяльником (табл. 1). Этот способ может применяться также для сварки тонких заготовок из жесткого материала или приварки накладки толщиной до 4—5 мм к более толстому материалу. Однако в некоторых случаях, например, при сварке полистирола, винипласта, полиэтилена, прилипание материала к разогретому инструменту может затруднять использование данного метода. Режим сварки оргстекла горячим паяльником и полученные при этом прочностные показатели приведены в табл. 7.

Сварка нагретыми роликами, лентой. Пленочные материалы сваривают последовательно с помощью горячего инструмента типа роликов, ленты и т. п., при этом нагретый инструмент, в отличие от горячего лезвия, перемещается по поверхности нахлестки, вызывая разогрев по толщине и сдавливание пленок (табл. 1). Необходимо строго соблюдать режим сварки, так как имеется опасность перегрева пленок, при этом пластические свойства сварных соединений снижаются. Данный метод сварки осуществляется как вручную, так и полуавтоматически.

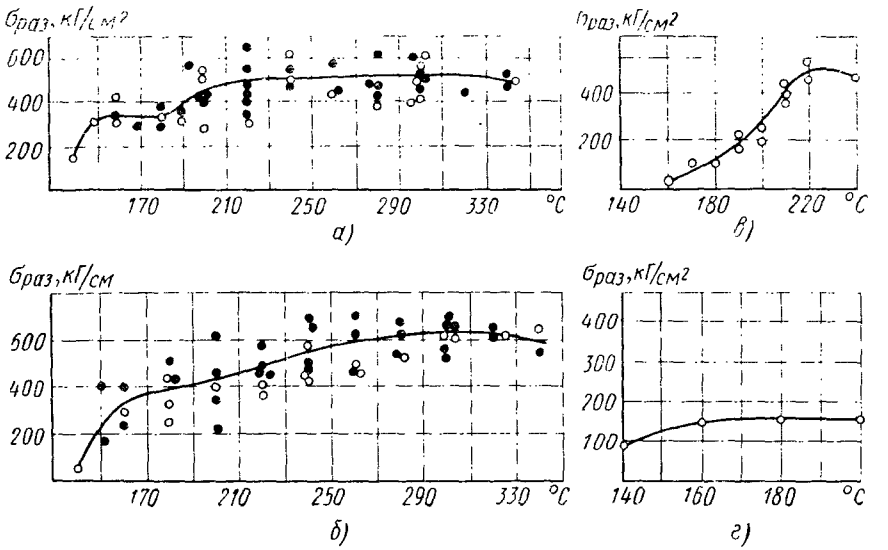


Рис. 6. Зависимость прочности стыковых соединений, выполненных горячим «дезвием», от температуры сварки (давление при сварке 10 *кГ/см*²): *а* — для стекла СОЛ; *б* — для стекла СТ-1; *в* — для ПВХ; *г* — для ПС

Для полуавтоматической сварки прямолинейных нахлесточных швов крупногабаритных изделий из полиэтиленовой пленки толщиной 25—100 *мк* разработана машина МСН-1 (табл. 8). Сварку выполняют через прокладку из целлофана или фторопласта. Сварочная головка имеет четыре ролика, закрепленных

7. Режимы сварки органстекла нагретыми элементами и прочность сварных соединений

Тип соединения и метод сварки	Температура сварки в °С	Давление в *кГ/см*²	Продолжительность выдержки в *мин*	Предел прочности на сдвиг в *кГ/см*²				Место разрушения
				СОЛ	СТ-1	ПВХ	ПС	
Внахлестку горячим паяльником	240—300	1	—	350	370	—	—	По основному материалу
	200—220	2—1		—	—	250	—	По сварке
	160—180						200	То же
Внахлестку горячим прессованием	140—160	5—10	15	300	—	—	—	По основному материалу
	160—180	5—10		—	380	—	—	
	180—200	3—6		—	—	320	—	
	120—130	3—6		—	—	—	230	
«На ус» горячим прессованием	140—160	5—10	15	400	420*	—	—	
	160—180			—				

* На разрыв.

нонарно и нагреваемых электрической спиралью из нихрома. На роликах вращается лента, которая передает тепло через целлофан или фторопласт свариваемой полиэтиленовой пленке. Постоянный температурный режим поддерживается автоматически. Машина устанавливается на подвесные направляющие и двигается вдоль конфекционного стола по свариваемому материалу.

8. Техническая характеристика машин МСП-1 и МСП-4

Показатели	МСП-1	МСП-4
Способ сварки	Контактный	
Нагрев материала в зоне сварки	Односторонний	Двусторонний
Процесс сварки	Непрерывный	
Ширина сварного шва в *мм*	5	5
Температура нагрева лент в °С, не выше	500	500
Максимальное контактное давление в *кГ/см²*, не выше	6	3
Охлаждение шва	—	Водяное
Скорость сварки в *м/мин*	12	0,08 — 0,9
Рабочий ход сварочной головки в *мм*	—	450
Напряжение сети в *в*	—	220
Габаритные размеры *мм*	725×1030×1095	145×1000 ×1240
Вес в *кГ*	113	205

Полуавтоматическая сварка изделий из фторопластовых пленок толщиной до 500 *мк* выполняется на МСП-4. Она позволяет сваривать прямолинейные и криволинейные нахлесточные швы с большим радиусом кривизны. Сварка производится при непосредственном контакте пленки с лентами, которые получают тепло от нагревательного элемента. Подача материала осуществляется этими же лентами.

Термоимпульсная сварка. При этом методе пленочный материал нагревается до температуры сварки практически мгновенно за счет пропускания через нагревающие элементы импульса тока большой силы.

Для целей термоимпульсной сварки могут применяться различные формы нагревательных элементов: точечные, полосовые, фигурные. Этот метод позволяет при точной дозировке тепла избежать перегрева пленочных пластмасс в месте сварки. Наиболее широкое применение находят сварочные клещи для работ, связанных с упаковкой относительно небольших изделий.

Сварка горячим прессованием. При сварке прессованием тепло передается к месту сварки через поверхности зажимных нагретых прессов (табл. 1), позволяет применять весьма большие давления и осуществлять локальный разогрев. Этот способ называют также прессованием в закрытом приспособлении. Его применяют для сварки встык листов, стержней, полос, пластин.

Температура, давление и время сварки являются наиболее важными факторами, влияющими на прочность. В табл. 8 приведены режимы и прочность сварных соединений оргстекла.

* * *

При сварке жестких пластмасс относительно большой толщины необходимо учитывать, что при разогреве материала больших сечений, например, в случае сварки нагревательными элементами внахлестку и «на ус», а также при сварке наяльником заготовок разной толщины, трудно избежать деформации сваренной заготовки с большой длиной шва вследствие усадки материала при охлаждении. Следует, если это необходимо для уменьшения внутренних напряжений, применять отжиг при температурах на 20—25° С ниже температуры размягчения данного материала.

Метод сварки нагревательными элементами обеспечивает высокую прочность соединений и достаточную производительность. Этим методом можно сваривать также пластмассы, которые токами высокой частоты сварены быть не могут (фторопласт, полиэтилен, полистирол и др.). Можно сваривать угловые, стыковые и тавровые соединения. При сварке оргстекла в месте соединения сохраняется прозрачность.

СВАРКА ТРЕНИЕМ

При сварке режим процесса подбирают так, чтобы в течение нескольких секунд концы деталей нагрелись до требуемой температуры, затем относительное движение поверхностей трения прекращается, а приложенное давление P обеспечивает сварку. Процесс заканчивается естественным охлаждением изделия, сжатого осевым усилием. Предложены схемы сварки, при которых вращается только короткая вставка между свариваемыми деталями. Такой способ делает

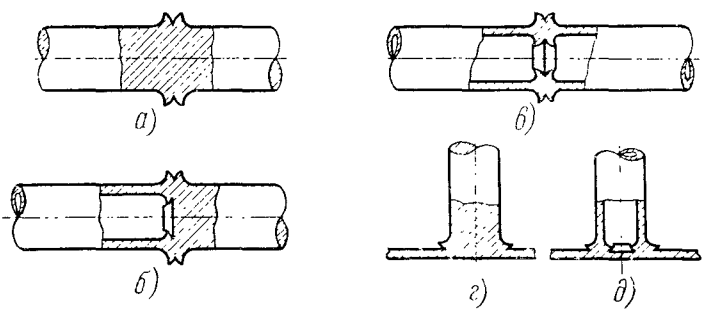


Рис. 7. Типы сварных соединений, выполняемых при нагреве трением: *а* — стержни встык; *б* — трубы встык; *в* — стержень и труба встык; *г* — стержень вприток к листу; *д* — труба вприток к листу

перспективной сварку трением трубопроводов и арматуры. Качество соединений и, в особенности, производительность процесса в значительной мере зависят от скорости относительного движения поверхностей трения, осевого усилия и величины пластической деформации (осадки).

Метод сварки трением имеет ряд достоинств; высокие механические свойства соединения и к. п. д. процесса; большая производительность, легкость автоматизации, возможность сварки в полевых условиях.

Однако область ее применения ограничена, так как необходимо чтобы одна из деталей представляла собой тело вращения; в свариваемом сечении она должна иметь форму круга или кольца. При сварке и сжатии свариваемых поверхностей в месте соединения наблюдается утолщение (что в ряде случаев нежелательно), и, кроме того, при необходимости соблюдения размеров заготовка должна иметь длину, большую, чем это требуется в сварном изделии.

В настоящее время разработаны способы сварки трением лишь для следующих видов соединений, двух стержней или двух труб, или трубы со стержнем встык (рис. 7, *а* — *в*), стержня или трубы с плоскостью (рис. 7, *г*, *д*) или с поперечной трубой.

Практически сварка трением может быть выполнена почти на любом токарном станке, а также на сверлильных станках некоторых видов. Технологический процесс сварки изделий цилиндрической формы на токарных станках заключается в следующем. Перед сваркой концы труб калибруют, нагревают в масле

до 100° С в течение 3 – 4 *мин*, помещают калибр на 3 *мин*, после чего охлаждают водой до комнатной температуры, затем зажимают в суппорте, патроне станка и люнете. После точной центровки и выравнивания концов труб одну трубу приводят во вращение, а другую слегка поджимают к ней с помощью суппорта. Число оборотов зависит от диаметра трубы: при $D = 50$ *мм* $v = 800$ *об/мин*; при $D = 80$ *мм* $v = 600$ *об/мин*. Время вращения 1—1,5 *мин*.

После нагрева концов труб протяженностью 2 –3 *мм* на сторону для вязкотекучего состояния (140 –160° С) станок останавливают и с помощью суппорта создают давление 2—4 *кГ/см*², которое не снимают до полного естественного охлаждения шва (7—10 *мин*).

СВАРКА ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

В промышленности находит все более широкое применение нагрев металлов и неметаллических материалов токами высокой частоты. Сущность процесса нагрева и сварки пластмасс т. в. ч. состоит в следующем. Свариваемое изделие из пластмассы помещают в переменное электрическое поле высокой частоты, которое создается между металлическими электродами. Вследствие того, что пластмассы являются несовершенными диэлектриками, элементарные заряды при внесении диэлектрика в высокочастотное электрическое поле смещаются, небольшое количество имеющихся в диэлектрике свободных зарядов образует ток проводимости. На смещение заряженных частиц затрачивается работа, которая превращается в тепло. Каждое изменение напряжения электрического поля влечет за собой выделение некоторого количества тепла. Поэтому для интенсификации процесса сварки пластмасс применяют токи частоты порядка 10—50 *Мгц*.

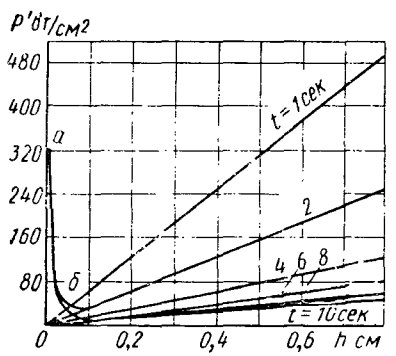


Рис. 8. Зависимость удельной мощности P', подводимой к рабочему конденсатору, отнесенной к 1 *см*² поверхности шва, от суммарной толщины h материала при разном времени нагрева

Сварка пластических масс происходит по линии, расположенной непосредственно под электродами. Под воздействием тока высокой частоты пластические массы нагреваются до температуры вязко-текучего состояния, а давление, приложенное к электродам, создает необходимый контакт между свариваемыми поверхностями. Сварка в большинстве случаев производится без присадочного материала.

Мощность, расходуемая на нагрев, зависит от толщины нагреваемого материала и времени нагрева (рис. 8).

Способность пластмасс нагреваться в переменном электрическом поле определяется величиной потерь энергии в них, которую называют фактором диэлектрических потерь, равным произведению диэлектрической проницаемости на тангенс угла потерь: $K = \varepsilon \operatorname{tg} \delta$.

Сварке т. в. ч. подвергают только те пластики, фактор диэлектрических потерь которых составляет несколько сотых долей единицы. К ним относятся такие термопласты, как поливинилхлорид, поливинилиденхлорид, поливинилацетат, полиамиды, эфиры целлюлозы, полиакрилаты, полиметакрилаты, полиацетали, полиуретаны и отвержденные материалы (табл. 9). Вследствие низкого фактора потерь у полиэтилена, полистирола, политетрафторэтилена, полиизобутилена и полиэтилентерефталата, являющихся хорошими диэлектриками, высокочастотная сварка без вспомогательных средств этих пластмасс невозможна.

9. Диэлектрические показатели и фактор потерь пластмасс различного типа при частоте 10^6 и температуре 20° С

Материал	ε	tg δ	K
Поливинилхлорид:			
жесткий	2.8–3.4	0.015–0.04	0.042–0.136
пластифицированный	3.3–4.5	0.04–0.09	0.132–0.405
Поливинилиденхлорид	3.0–5.0	0.05–0.08	0.15–0.40
Поливинилбутираль	3.3–3.9	0.06	0.198–0.234
Поливинилацеталь	2.7	0.016	0.042
Полиамид-68	3.8–4.2	0.025–0.03	0.025–0.128
Ацетилцеллюлоза	3.2–7.0	0.01–0.1	0.032–0.7
Полиметилметакрилат	2.9–3.2	0.02–0.03	0.058–0.096
Политетрафторэтилен	1.9–2.2	0.00025	0.000475–0.00055
Полиэтилентерефталат	3.0	0.02	0.006
Полиэтилен	2.2–2.4	0.0001–0.0004	0.00022–0.00096
Полипропилен	2.0	0.0001	0.0002
Полистирол	2.4–2.7	0.0001–0.002	0.00024–0.0054

Удельная мощность, которая выделяется в виде тепла при нахождении диэлектрика в электрическом поле,

$$P = 0{,}55 \cdot 10^{-8} \varepsilon \delta f E^2 \ вт/м^3,$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость материала;

tg δ — тангенс угла диэлектрических потерь;

E — напряженность поля в *в/м*;

f — частота колебаний электрического поля в *гц*.

Удельная мощность электрического поля, теоретически необходимая для осуществления процесса сварки,

$$P = \frac{\rho C}{\eta_T} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \ вт/м^3,$$

где ρ — плотность материала в *кг/м*^{3};

C — удельная теплоемкость материала в *дж/кг·град*;

$\frac{\Delta T}{\Delta t}$ — скорость нагрева материала;

ΔT — приращение температуры в *град* в промежуток времени Δt в *сек*;

η_T — термический к. п. д. процесса нагрева, учитывающий потери тепла в окружающую среду.

Процесс теплообразования в электрическом поле высокой частоты определяется частотой и напряженностью электрического поля и диэлектрическими свойствами полимера и не зависит от его размеров и теплопроводности. При сварке т. в. ч. нагрев места сварки происходит очень быстро и относительно равномерно по всей толщине. Вследствие того, что с поверхности нагретой пластмассы тепло отводится металлическими электродами, максимальная температура достигается на соединяемых поверхностях. Такое распределение температуры по толщине свариваемых материалов — одно из основных преимуществ сварки т. в. ч.

Сварка пластмасс в поле т. в. ч. может быть точечной, прессовой и роликовой. Производительность прессовой сварки выше, чем роликовой. Метод легко автоматизируется. Выпущены специальные установки для точечной и шовной сварки пленочных пластмасс и для прессовой сварки пленок, листов и труб. При шовной сварке пленки, уложенные внахлестку, протягиваются между

роликами, являющимися высокочастотными электродами. Скорость сварки пленок т. в. ч. составляет 27—65 *м/ч*.

Прессовая сварка более универсальна и применяется для соединений изделий различной формы, изготовленных из термопластичных или из отвержденных пластмасс. Соединение выполняют внахлестку, встык, встык с одной или двумя накладками, втавр, на ус.

При сварке используют сменные электроды (штампы), предназначенные для образования сварных швов заданной конфигурации и размеров. Конфигурация элементов может быть различной в зависимости от вида сварного соединения (рис. 9).

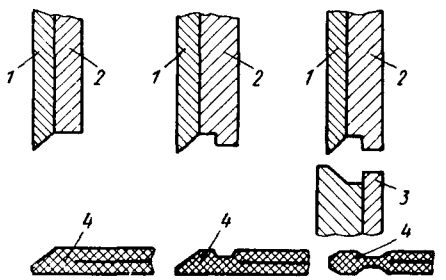


Рис. 9. Некоторые формы электродов и виды сварных соединений, выполненных т. в. ч.: *1* — нож для обрезки кромки пластмасс; *2* — электрод; *3* — контрэлектрод; *4* — форма сварного шва

В табл. 10 приведены характеристики некоторого оборудования для сварки пластических масс т. в. ч.

Для сварки пластмасс применяют высокочастотные генераторы ЛГ, предназначенные для нагрева диэлектриков, изготовляемые в серийном производстве. Сварку т. в. ч. применяют при изготовлении изделий ширпотреба (бумажников, дамских сумок, поясов, обложек записных книжек, планшет и т. п.), а также в строительстве и машиностроении при упаковке изделий в пленочный материал, при изготовлении некоторых тонкостенных деталей. При сварке труб из листов винипласта продольные швы выполняют участками длиной 100 *мм*, кольцевые швы — встык в специальных разъемных электродах.

Сварка т. в. ч. дает более высокое качество соединений, производительнее и экономичнее некоторых рассмотренных выше способов (табл. 11). Этим методом

10. Промышленное оборудование для сварки пластических масс токами высокой частоты [2]

Показатели	Роликовые машины типов		Сварочные прессы		
	ЛГС-02	МСТ-3М	ЛГС-1.5	ЛСП1-0.6	ЛС1-0.3
Номинальная колебательная мощность в *вт*	200	—	1500	630	250
Частота в *Мгц* ($\cdot 10^6$)	39	39	39	40.6	39
Толщина пленок в *мм*	—	—	0.1—1.0	0.2—2.0	0.2—0.5
Скорость подачи материала в *м/мин*	0.5—3	3	—	—	—
Максимальная площадь электродов в $см^2$			6	16	3
Давление в *кГ*			2.00	0.9	3
Габариты машины в *мм*:					
длина	1100	1100	1700	800	255
ширина	700	700	850	900	340
высота	1200	1200	950	1700	310

сваривают материалы толщиной до 5 *мм*. При сварке т. в. ч. следует учитывать наличие высокого напряжения на электродах и радиопомехи, требующие создания специальных защитных устройств.

11. Основные показатели сварки винипласта и пластиката горячим воздухом, нагретым инструментом и токами высокой частоты

Свойства сварных соединений	Сварка горячим воздухом. Винипласт: трубы $s = 3{,}0$ мм, листы $s = 2{,}5$ мм	Сварка нагретым инструментом. Эластичный пластикат $s = 0{,}25$ мм	Сварка т. в. ч.		
			Трубы винипласта $s = 3$ мм	Листовой винипласт $s = 2{,}5$ мм	Эластичный пластикат $s = 0{,}25$ мм
Скорость сварки в *м/ч*	42	60	24	90	300—600
Ударная вязкость сварного шва в % по отношению к целому материалу	3,6—5,2	—	60—100	60—100	—
Предел прочности на растяжение в % по отношению к целому материалу	30—50	—	80—100	80—100	100

СВАРКА УЛЬТРАЗВУКОМ

При сварке пластмасс ультразвуком механические перемещения частиц свариваемого материала перпендикулярны свариваемым поверхностям и происходят в одном направлении с прилагаемым давлением. Машина для сварки пластмасс (табл. 12) состоит из тех же элементов, что и машина для ультразвуковой сварки металлов.

12. Характеристика машин для ультразвуковой сварки пластмасс

Показатели	Типы машины	
	УПТ-14	УАП-11
Толщина свариваемого материала в *мм*	2—2	0,5—0,5
Мощность магнитострикционного преобразователя в *квт*	3,0	2,0
Максимальное число ходов в минуту	30	
Полезный вылет в *мм*	—	250
Максимальное давление на сварочный инструмент в *кГ*	60	50
Привод	Пневматический	Пружинный
Рабочая частота в кгц	20	20
Напряжение питающей сети в *в*	220/380	220/380
Тип генератора	УЗГ-10	УЗГ-2,5
Пределы регулирования времени сварки электронным реле в *сек*	0,2—15	—
Охлаждение магнитострикторa	Водяное	
Габаритные размеры машины в *мм*	1200×540×1090	720×420×360
Вес машины в *кг*	240	30
Конструкция	МВТУ-МЭИ	МВТУ-МЭИ

При сварке изделие *4* (см. табл. 1) зажимается между концом концентратора (волновода) *3* и подвижной опорой *5*, к которой прикладывается усилие сжатия *P*, необходимое для создания давления в процессе сварки. Сварка происходит в момент включения электрического тока высокой частоты на обмотку *1* вибратора. Возникающие при этом в вибраторе высокочастотные упругие колебания передаются через конец волновода в виде вертикальных механических перемещений той же частоты.

Длительность процесса сварки зависит от толщины и свойств свариваемого материала. При точечной и прессовой сварке продолжительность возбуждения упругих колебаний регулируется реле времени.

С целью использования одного блока колебаний для выполнения различных форм сварных швов применяют сменные ввинчивающиеся наконечники.

С помощью ультразвука можно сваривать многие пластмассы: органическое стекло, винипласт, полиэтилен, хлорвинил, капрон, нейлон, ПОВ-50 (полиэтилен + + полиизобутилен), полистирол, СНП (сополимер стирола, нитрил акриловой кислоты и натурального каучука СКП-26), перфоль (плепка), лавсан (волокно), смолу 68 и др.

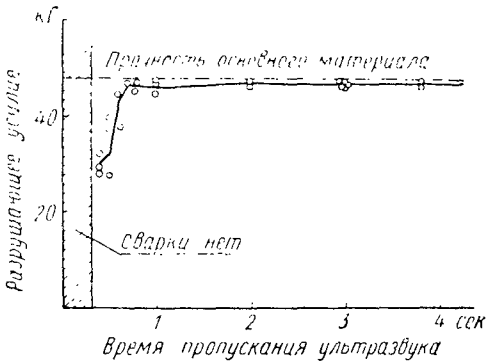


Рис. 10. Прочность на разрыв сварных стыковых соединений СНП толщиной 2,2 мм в зависимости от времени пропускания ультразвука

Процесс сварки ультразвуком по внешнему виду подобен процессу контактной сварки или сварки т. в. ч. Легче всего осуществляются нахлесточные и тавровые точечные соединения. Так же удовлетворительно выполняется сварка нахлесточных соединений, шовных и по контуру. Все соединения выполняют без разделки кромок и без присадочного материала.

Прочность сварных соединений СНП (рис. 10) практически равна прочности основного материала.

Особенности метода ультразвуковой сварки следующие:

1) не требуется второго электрода, так как сварка осуществляется односторонним способом. Таким образом, вторая деталь может быть неограниченной толщины и доступ к ней не обязателен (рис. 11, *а*);

2) энергию можно вводить на значительном расстоянии от места соединения (рис. 11, *б*). Это позволяет сваривать относительно большие толщины и осуществлять сварку конструкций, в которых затруднен доступ к месту сварки (рис. 11, *в*);

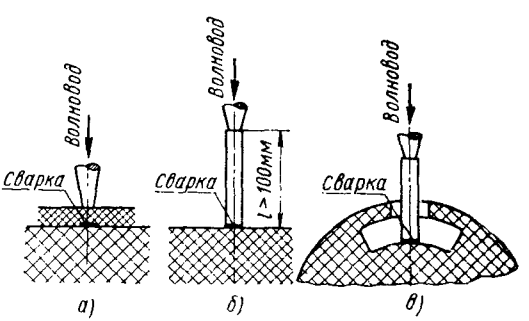


Рис. 11. Схемы сварки ультразвуком пластмасс: *а* — малой толщины к неограниченно большой; *б* — длинного стержня к поверхности; *в* — стержня в труднодоступном месте

3) максимальный разогрев происходит на свариваемых поверхностях, вследствие этого имеется возможность исключить значительный перегрев пластмасс по толщине или по длине привариваемого стержня;

4) концентрация нагрева на свариваемых поверхностях обеспечивает высокую производительность процесса;

5) сварка может осуществляться по поверхностям, загрязненным различными сыпучими материалами (мука, мел, сажа и т. п.), маслами (сыры, солидол, вазелин и т. п.), электропроводными жидкостями (кислоты, соляные растворы, тузлук, томатная паста и т. п.);

6) при правильно выбранном режиме не происходит перегрева поверхностей, к которым подводится ультразвук;

7) не создается радиопомех;

8) к свариваемым выступам не подводится напряжение;

9) более широкий ассортимент термопластичных пластмасс и большие толщины, чем, например, при сварке токами высокой частоты;

10) легкость автоматизации

По-видимому, наиболее широкое применение сварка ультразвуком найдет для изделий средних и больших толщин с точечными и контурными соединениями.

ЯДЕРНАЯ СВАРКА

Сущность метода состоит в облучении пластмасс потоком нейтронов. Чтобы произвести сварку, на поверхности пластмасс предварительно наносят тонкий слой соединений лития или бария. При облучении нейтронами в этих элементах возникают ядерные реакции, сопровождающиеся выделением энергии. При этом в пограничном слое пластмассы нагреваются до вязко-текучего состояния и свариваются. Эксперименты показывают, что этим способом удается сварить тефлон с полиэтиленом, полистиролом, кварцем, алюминием и некоторыми другими материалами.

Недостатком метода «ядерной» сварки является ее неприменимость к некоторым материалам, которые под действием нейтронного облучения приобретают значительную радиоактивность.

СВАРКА ИНФРАКРАСНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ (ИК-СВАРКА)

Принцип сварки состоит в использовании в качестве источника тепла инфракрасного излучения, получаемого при накаливании силитовых стержней, спиралей из хромистой стали, стержневых кварцевых ламп и др. Для интенсификации процесса сварка осуществляется на подложке из поролона, микропористой резины и толстых прорезиненных тканей черного цвета. Упругость подложек, плотно прижатых к пленкам, обеспечивает необходимое давление при сварке.

Хорошо свариваются ИК-излучением пленки полиэтилена высокого давления. Предельная толщина свариваемого материала зависит от условий облучения. Например, при использовании в качестве источника ИК-излучения силитового стержня с температурой 1200° С, расположенного на расстоянии 12—14 *мм* от материала, и в качестве подложки — микропористой резины предельная толщина свариваемого полиэтилена высокого давления достигает 1,5—2 *мм*. Инфракрасным излучением можно сваривать все полимерные пленки, переходящие при нагреве в вязко-текучее состояние и не требующее при сварке больших давлений. Отсутствие непосредственного контакта расплавленной зоны полимера с источником нагрева при сварке ИК-излучением позволяет получить сварные соединения без подрезов и с большей прочностью, чем при сварке с помощью нагретых элементов. Метод сварки ИК-излучением дает возможность сваривать многолистовые пакеты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брицын Н. Л. Нагрев в электрическом поле высокой частоты. Машгиз, 1954.
2. Брицын Н. Л., Федорова И. Г. Сварка термопластических пластмасс. Сборник «Промышленное применение токов высокой частоты», ЛОНИТОМАШ, вн. 33, Машгиз, 1954.
3. Зайцев К. И. и др. Тепловые процессы при сварке полиэтиленовых труб. «Сварочное производство», 1968, № 7.
4. Мордвинцева А. В., Ольшанский Н. А. Сварка пластмасс ультразвуком. Опыт работы промышленности Совнархоза № 5, 1960.
5. Николаев Г. А., Ольшанский Н. А. Новые методы сварки металлов и пластмасс. «Машиностроение», 1966.
6. Смирнов Б. М. Сварка пластиката токами высокой частоты. «Сварочное производство», 1960, № 9.
7. Сборник трудов МВТУ им. Баумана Н. Э. Применение пластмасс в машиностроении. МВТУ, 1968.
8. Тростянская Е. Б., Комаров Г. В., Шишкин В. А. Сварка пластмасс. «Машиностроение», 1967.

ГЛАВА XIV

СВАРКА И ПАЙКА МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ И ПАЙКИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И СХЕМ

Способы сварки

Термокомпрессия — метод соединения металлов с металлами и неметаллами в твердом состоянии при относительно невысоких удельных давлениях и нагреве до температуры ниже температуры образования эвтектики свариваемых материалов. По терминологии, принятой в области сварки, более правильно термокомпрессию называть — микросварка давлением с подогревом. Температура

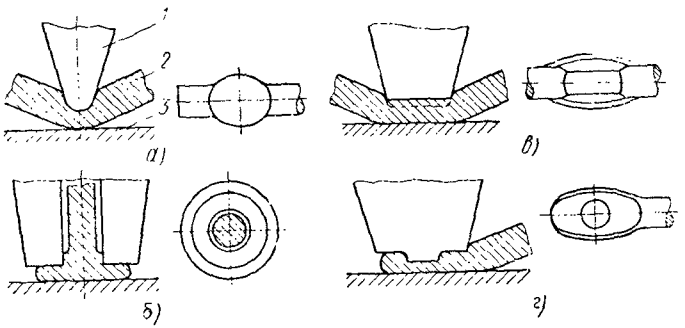


Рис. 1. Основные виды термокомпрессионных соединений: *а* — в виде плоской сварной точки (термокомпрессия клином); *б* — в виде шляпки гвоздя (термокомпрессия цилиндром с образованием шарика); *в* — с ребром жесткости (термокомпрессия инструментом с канавкой); *г* — типа «рыбий глаз» (eylet — bond) (термокомпрессия инструментом с выступом); *1* — инструмент; *2* — проволока; *3* — подложка

нагрева изделия при термокомпрессии примерно соответствует температуре отпуска или отжига более пластичного соединяемого металла. Процесс обычно ведется в защитной атмосфере. Этим способом можно соединять мягкие высокоэлектропроводные материалы с полупроводниковыми материалами и электропроводными тонкими пленками, напыленными на хрупкие диэлектрические подложки (рис. 1). Однако термокомпрессией весьма трудно сварить ковар, никелевые и железные сплавы. Наиболее часто этот метод используют при соединении полупроводниковых микроприборов и интегральных схем в разнообразных корпусах гибкими проволочными проводниками (интегральная схема —

микромининатюрный функциональный узел электронной аппаратуры, в котором элементы изготовляются в одном технологическом цикле на поверхности или в объеме материала подложки и имеют общую герметизацию и защиту от механических воздействий) [6].

Сварка давлением с косвенным импульсным нагревом является разновидностью способа сварки давлением. Инструмент (пуансон) нагревается импульсно проходящим по нему током (рис. 2). Этот способ сварки можно с успехом использовать при монтаже гибридных интегральных схем. Он находит широкое применение в интегральных микросхемах, которые не допускают общего разогрева, т. е. метода соединения термокомпрессией.

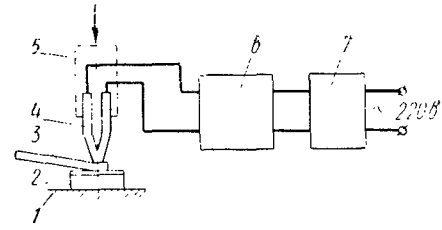


Рис. 2. Схема сварки давлением с косвенным импульсным нагревом V-образным инструментом: *1* — рабочий столик; *2* — подложка или полупроводниковый кристалл; *3* — проводник; *4* — V-образный инструмент (пуансон); *5* — сварочная головка для создания давления; *6* — источник питания; *7* — реле времени

Контактная сварка — распространенный метод соединения различных радиоэлектронных компонентов. Основные ее схемы показаны на рис. 3. Для приварки навесных элементов с круглыми и плоскими выводами к тонким пленкам на хрупких подложках и к печатному монтажу наиболее перспективна сварка сдвоенным электродом (электродами с параллельным зазором — рис. 3, *в*).

Для сварки проводников, имеющих легкоплавкую изоляцию, с печатными платами можно с успехом применить комбинированный способ трехэлектродной контактной сварки (рис. 4) [12]. Однако его нельзя использовать для сварки двух изолированных проводников.

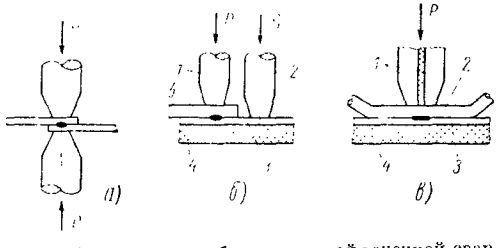


Рис. 3. Основные способы контактной точечной сварки микросхем: *а* — сварка с двусторонним расположением электродов; *б* — односторонняя контактная сварка: *1* — электрод для сжатия свариваемых деталей и подвода тока к проволоке; *2* — электрод для подвода тока к шине печатной платы; *3* — контактная площадка или шина печатной платы; *4* — диэлектрическое основание печатной платы; *5* — привариваемая проволока или лента; *в* — контактная сварка сдвоенным электродом (с параллельным зазором): *1* — сдвоенный электрод; *2* — привариваемый проводник; *3* — тонкая металлическая пленка; *4* — диэлектрическая подложка

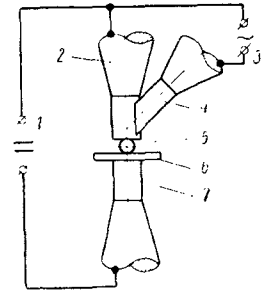


Рис. 4. Способ трехэлектродной контактной сварки: *1* — источник постоянного тока (например, конденсаторный); *2* — верхний основной электрод; *3* — источник переменного тока; *4* — вспомогательный электрод; *5* — провод в изоляции; *6* — фольга или более толстый металл без изоляции; *7* — нижний электрод

Ультразвуковая сварка успешно используется при изготовлении гибридных схем, транзисторов и интегральных схем. В радиоэлектронике применяют следующие способы сварки: ультразвуковую сварку с косвенным импульсным нагревом [2]; термокомпрессию с ультразвуком; ультразвуковую сварку крутильными колебаниями. Ультразвуковую сварку используют для выполнения

монтажа гибкими проводниками, присоединения кристалла к корпусу и беспроволочного монтажа интегральных схем методом «перевернутого кристалла».

Лазерная сварка [8] находит применение при монтаже различных элементов радиоэлектронной техники. Круглые и плоские проводники толщиной 0,05—0,5 *мм* из меди, никеля, золота, ковара, нержавеющей стали, тантала хорошо свариваются встык, внахлестку, Т-образно и крестообразно.

Сварка электронным лучом (и в первую очередь — импульсная) обладает рядом особенностей: точное регулирование и управление тепловой энергией; локальный нагрев; возможность сварки деталей малых размеров; легкость программирования и автоматизации всего процесса сварки [7], которые позволяют успешно применять ее для монтажа и герметизации радиоэлектронных устройств.

Холодная сварка осуществляется за счет пластической деформации свариваемых деталей под действием давления без дополнительного подогрева. Для получения высококачественного сварного соединения при холодной сварке необходимо обеспечить точную сборку и чистоту свариваемых поверхностей и необходимую степень деформации. Соединяемые металлы должны обладать достаточно высокой пластичностью. Она применяется для герметизации металлостеклянных корпусов приборов.

Микросварка давлением с образованием эвтектики заключается в нагреве деталей до температуры образования эвтектики соединяемых материалов при одновременном сжатии. Способ наиболее приемлем для непосредственного присоединения плоских выводов к полупроводниковым кристаллам, если требуется сравнительно большая площадь контакта (0,2—2 $мм^2$), а также при соединении кристаллов интегральных схем с золоченой поверхностью корпуса.

Сварка микроплазмой является разновидностью дуговой сварки плавлением. Отличительная особенность процесса — создание ионизированного потока инертного газа аргона (низкотемпературной плазмы) и расплавление металла за счет прохождения сварочного тока через плазму и за счет тепла плазмы. Этот способ применяется для герметизации корпусов приборов.

Способы пайки

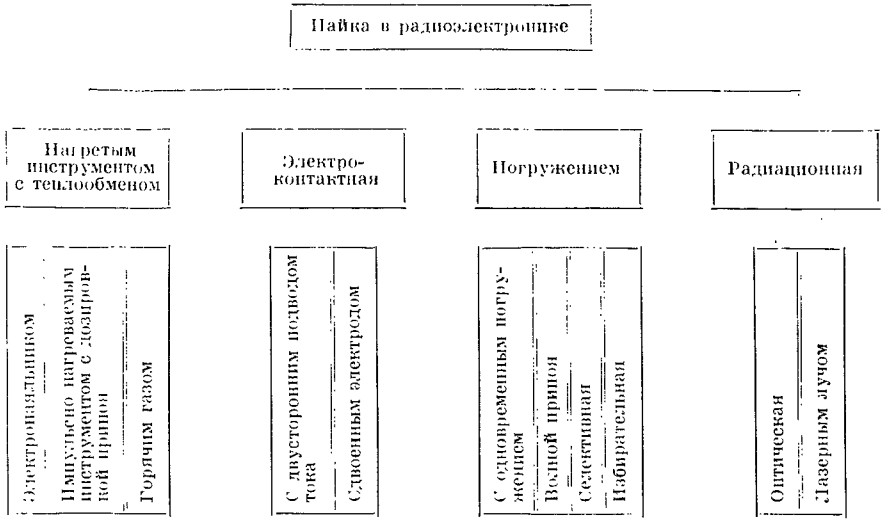
Классификация способов пайки, применяемых при производстве радиоэлектронных изделий, приведена ниже.

Пайка электропаяльниками находит применение при монтаже на печатные платы навесных элементов. При пайке импульсно нагреваемым инструментом с дозировкой припоя разогрев места пайки производится за счет теплопередачи от инструмента, импульсно нагреваемого проходящим электрическим током. Пайка погружением является одним из методов пайки печатных плат при одностороннем монтаже навесных элементов путем пропускания их выводов через отверстия в плате на нижнюю сторону [3]. Пайка волной припоя является улучшенным вариантом пайки печатных плат погружением. При пайке струей припоя печатная плата движется в горизонтальном направлении над гребнем струи так же, как при пайке волной припоя. Метод селективной пайки является разновидностью метода пайки погружением с применением защитной маски-трафарета. Метод избирательной пайки с принудительной подачей припоя заключается в подаче расплавленного припоя из ванны через специальную фильеру в каждую точку платы, подлежащую пайке. Оптический метод пайки заключается в использовании точечного источника света, излучение которого с помощью системы линз и зеркал направляется в точку пайки. Пайка лазерным излучением отличается от оптической пайки только источником светового излучения, в качестве которого используется квантовый оптический генератор.

Припои. Для пайки навесных элементов к пленочному и печатному монтажу применяют низкотемпературные припои, которые могут паяться с бескислотными флюсами. Для герметизации корпусов радиоэлектронных схем пайкой весьма часто используются припои, содержащие серебро и имеющие темпера-

туру плавления около 573° К (300° С) [9]. При монтаже радиоэлектронной аппаратуры широко применяют дозированный припой в виде шариков, таблеток, небольших колец, шайб и т. д. Наилучшим припоем для пайки соединения в гибридных схемах являются припои ПОС-61 и ПОС-61 с добавками 3% серебра или золота [1].

Классификация способов пайки



Флюсы, применяемые для пайки монтажных соединений в радиоэлектронных схемах, должны хорошо растворять окисную пленку, предохранять от окисления во время пайки и хорошо смачивать поверхности основного металла и жидкого припоя. Остатки флюса на месте пайки должны обладать изоляционными свойствами и не вызывать коррозии. Наиболее широко применяют флюсы на основе канифоли. В тех случаях, когда допускается тщательная промывка паяных соединений, можно использовать высокоактивные кислотные флюсы.

МОНТАЖ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В КОРПУС

Процесс монтажа кристалла с готовой микросхемой в корпус обычно разбивается на два этапа: присоединение кристалла к корпусу и монтаж межсоединений между контактными площадками кристалла и внешними выводами корпуса.

При монтаже большинства транзисторов и, особенно, интегральных схем требуется ориентация кристалла перед сваркой и относительно точная установка его в корпусе. Кристалл к корпусу присоединяют пайкой эвтектическими сплавами (припоями), за счет контактного плавления, а также приклеиванием легкоплавкими стеклами или термостойкими клеями. В качестве электропроводных

материалов наиболее широко используются эвтектические сплавы золота с германием и кремнием. При пайке этими сплавами поверхность корпуса должна быть металлической или металлизированной. Наилучшие результаты получаются, если поверхность будет позолочена. При использовании эвтектических припоев пайка проводится в защитной атмосфере аргона, гелия, осушенного азота или «формир» газа (85% водорода и 15% азота). Кристаллы к золоченым корпусам можно присоединять без дополнительного припоя за счет контактного плавления поверхностей кремния и золота. Присоединение кристалла различными стеклами и термостойкими клеями производится без металлизации поверхности корпуса (если он керамический).

Наиболее распространенным методом сварки при монтаже приборов в корпусе проволочными выводами пока остается термокомпрессия (табл. 1).

1. Ориентировочные режимы термокомпрессии некоторых сочетаний материалов

Материал проводника	Материал полупроводника	Параметры режима			
		Температура нагрева в °С	Удельное давление в $кГ/мм^2$	Деформация проводника в %	Длительность сварки в *сек*
Золото	Кремний	350–380	14–15	75	До 10
	Германий	300–350	14–15	75	» 5
	Алюминий, напыленный на SiO_2	300—400	9–10	До 80	0.5–3
	Золото, напыленное на SiO_2	250—370	10—11	» 60	0.5—0.3
Алюминий	Кремний	400—450	6—7	До 90	До 30
	Германий	350–400	6–7	» 75	» 30
	Алюминий, напыленный на SiO_2	350–420	6—7	» 90	0.5–10
	Золото, напыленное на SiO_2	300–370	6–7	» 75	0.5–10

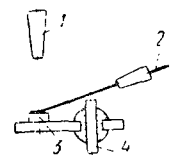
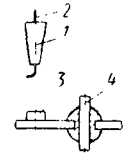
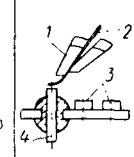
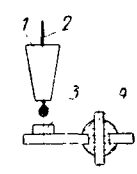
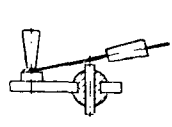
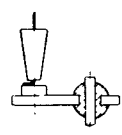
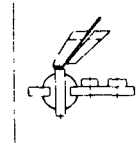
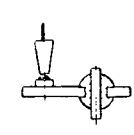
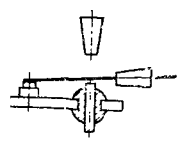
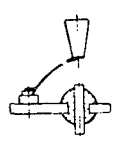
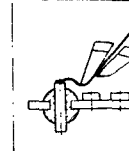
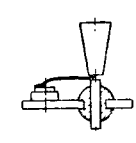
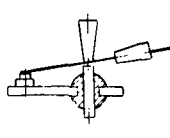
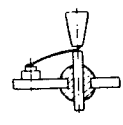
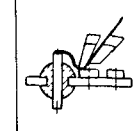
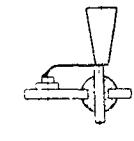
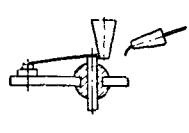
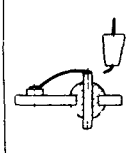
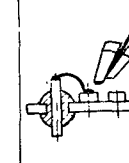
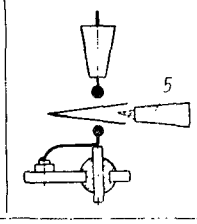
Примечание. Для конкретных условий режим термокомпрессии следует уточнить на технологических образцах с контролем прочности соединений.

Последовательность операции при создании проволочных соединений между контактными площадками интегральных схем или транзисторов и выводами корпуса различными способами приведена в табл. 2.

При сварке косвенным импульсным нагревом и ультразвуком с успехом можно применять I, II и IV варианты монтажа. При односторонней контактной сварке (см. рис. 3, *в*) приемлемой является только сварка внахлестку с боковой подачей проволоки (табл. 2).

Для интегральных схем, не допускающих длительного нагрева до высокой температуры, применяется сварка косвенным импульсным нагревом с сопутствующим подогревом до 100–250° С. Защищенная стеклом интегральная схема с контактными выступами из припоя припаивается непосредственно к медному печатному монтажу или контактным площадкам корпуса путем пайки импульсным нагревом в туннельной печи. Монтаж интегральных схем, имеющих «балочные» вывода в виде золотых полосок толщиной 20—30 *мкм*, шириной 100—200 *мкм* и длиной 0,5–1,0 *мм* (вывода создаются путем напыления на пластину кремния и последующего вытравливания) к подложке или в корпус производится термокомпрессией, сваркой косвенным импульсным нагревом или односторонней контактной сваркой.

2. **Технологические приемы выполнения соединений при монтаже полупроводниковых приборов в корпусе**

Операции	Соединение внахлестку			Соединение встык с образованием шарика и внахлестку капиллярным инструментом
	иглой	капиллярным инструментом	инструментом «птичий клюв»	
Совмещение проволоки и инструмента с контактной площадкой (для «птичьего клюва» с выводом — траверзой корпуса)				
Сварка первой точки				
Совмещение проволоки и инструмента с выводом корпуса				
Сварка второй точки				
Обрезка проволоки	Кромкой инструмента или ножницами 	Обрывом или ножницами 	Обрывом 	Пламенем горелки 

Обозначения: *1* — рабочий инструмент; *2* — проволока; *3* — контактная площадка прибора; *4* — вывод корпуса; *5* — горелка.

ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРОПРИБОРОВ И МИКРОСХЕМ

Существует большое многообразие способов защиты электронных приборов и микросхем от воздействия агрессивной среды и механических повреждений. Это герметизация: а) в прочные корпусы (металлостеклянные, металлокерамические, керамические, пластмассовые и пр.); б) компаундами непосредственно самих кристаллов приборов после присоединения гибких выводов к контактным площадкам; в) путем защиты переходов стеклом и создания внешних твердых выводов непосредственно на кристалле.

Чтобы обеспечить герметичность корпусов, необходимо надежно герметизировать их собственные внешние выводы и получать высококачественные сварные или паяные соединения корпуса с крышкой при герметизации после монтажа в корпус кристалла прибора.

Внешние выводы герметизируют твердыми или мягкими стеклами. В зависимости от того, какое используется для спая стекло, выбирается материал выводов корпуса. Твердые стекла спаивают с коваром ($\alpha = 47 \cdot 10^{-7}\ 1/^{\circ}C$) и молибденом ($\alpha = 55 \cdot 10^{-7}\ 1/^{\circ}C$), мягкие — с платиной, медью, платинитом и сталями Н47Х6 и Н47Д5 ($\alpha = 90 \cdot 10^{-7}\ 1/^{\circ}C$) [5]. Для стеклянного корпуса обычно берут твердое стекло, которое спаивают как с керамикой, так и с металлами. Вместо металлостеклянного спая можно использовать спай металлизированной керамики с металлом. Пайка металла со стеклом при изготовлении металлостеклянных корпусов производится в специальных туннельных конвейерных электрических печах.

Для герметизации металлостеклянных и металлокерамических корпусов металлическими крышками применяют:

электроконтактную сварку (круглые корпусы диаметром до 20 *мм* из сравнительно тонкого материала). Наибольшее распространение получила конденсаторная сварка;

холодную сварку (металлостеклянные корпусы полупроводниковых приборов);

пайку (плоские металлокерамические корпуса). Обычно пайку производят мягкими припоями с температурой плавления 180 - 220° С. Соединения высокого качества получаются при импульсном нагреве с помощью специальных нагревателей и предварительном облуживании соединяемых поверхностей.

СВАРКА И ПАЙКА ГИБРИДНЫХ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

Трудности создания соединений в гибридных тонкопленочных схемах заключаются в специфике пленочных элементов и особенностях контактируемых пар: чрезвычайно большая разница в толщинах соединяемых элементов (проводники диаметром 30—750 *мкм* и пленки толщиной менее 1 *мкм*) и большое различие физических свойств свариваемых элементов.

Для сварки проводников с тонкопленочными контактными площадками, напыленными на разнообразные подложки, применяют несколько способов в зависимости от сочетания свариваемых материалов выводов и контактных площадок (табл. 3).

При сварке проводников с металлическими пленками на изоляционных подложках из стекла, ситалла, керамики необходимо создать такой цикл нагрева свариваемых деталей, при котором не происходит разрушения подложки в зоне сварки в результате термического удара. Наиболее приемлемый термический цикл нагрева и охлаждения подложки в зоне сварки при соединении этих сочетаний приведен на рис. 5. Такой термический цикл можно осуществить при многоимпульсной конденсаторной сварке, сварке униполярным импульсом тока

специальной формы, а также при сварке на повышенной частоте (до 1000 *гц*) с определенным законом нарастания и спада амплитуды импульсов сварочного тока.

3. Свариваемость материалов выводов и контактных площадок при различных способах сварки

Материал контактных площадок и подложек	Способы сварки и материал выводов															
	Сварка сдвоенным электродом				Сварка давлением с косвенным импульсным нагревом				Ультразвуковая сварка				Термокомпрессия нагретой иглой			
	Никель	Золото	Алюминий	Медь	Никель	Золото	Алюминий	Медь	Никель	Золото	Алюминий	Медь	Никель	Золото	Алюминий	Медь
Золотая пленка с подслоем нихрома на ситалле или стекле	—	++	—	+	—	++	+	+	—	++	+	—	—	++	+	—
Медная пленка с подслоем нихрома на ситалле	—	+	—	+	—	+	+	+	—	+	+	+	—	+	+	—
Алюминиевая пленка на ситалле или стекле	—	+	—	+	—	+	+	—	—	+	++	—		++	+	—
Алюминий на кремнии или на двуокиси кремния	—	+	—	—	—	++	+	—	—	+	++	—	—	++	+	—
Медный серебряный печатный монтаж на гетинаксе или стеклотекстолите	+	++	—	+	—	+	—	+	+	+	—	+	—	+	—	—

Примечание. ++ — свариваются хорошо; + — свариваются удовлетворительно; — — не свариваются.

Способ соединения термокомпрессией с общим разогревом в большинстве случаев не применим для гибридных схем из-за невозможности нагрева навесных элементов до температуры термокомпрессии и окисления контактных площадок при длительном нагреве.

Для присоединения проводников из меди, золота, ковара и золоченого ковара толщиной 30—100 *мкм* к контактным площадкам из золота и меди на диэлектрических подложках наиболее перспективна контактная сварка сдвоенным электродом. Ультразвуковая сварка тонких проводников с напыленными пленками характерна невысокой энергией ультразвуковых колебаний и небольшим удельным давлением. Основными параметрами ультразвуковой сварки, влияющими на образование соединения, являются амплитуда колебаний и удельное давление на свариваемые детали. Проводники малых диаметров (30—100 *мкм*) с тонкими пленками более качественно свариваются на повышенных частотах (66 *кгц* и более). Деформация при оптимальных режимах составляет 55—60% по диаметру. Удельное давление при сварке алюминиевого проводника составляет около 4—8 *кГ/мм*^{2}, золотого 10—14 *кГ/мм*^{2}.

В ряде случаев для улучшения качества соединения наиболее приемлемы комбинированные способы сварки, например ультразвуковая сварка с импульсным косвенным нагревом (рис. 6) [3].

Для присоединения выводов в гибридных тонкопленочных схемах используется несколько способов пайки: ручным микропаяльником с дозировкой припоя; импульсным нагревом с дозировкой припоя или при предварительном лужении; электроконтактным нагревом сдвоенным электродом луженых проводников.

Относительно толстые проводники (диаметром или толщиной 150—750 *мкм*) к тонким пленкам на диэлектрических подложках необходимо присоединять пайкой, чтобы обеспечить равнопрочность соединения и проводника. Проводники диаметром 25—75 *мкм* с тонкими пленками можно паять только с применением импульсного нагрева. Однако даже в этом случае толщина золотой пленки на нихроме должна быть не менее 1000 Å.

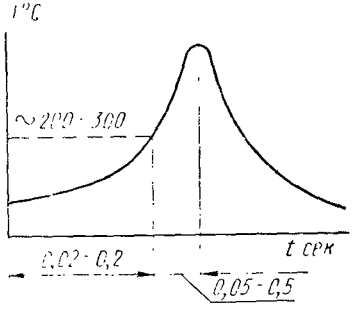


Рис. 5. Оптимальный термический цикл при сварке проводников с пленками на хрупких подложках

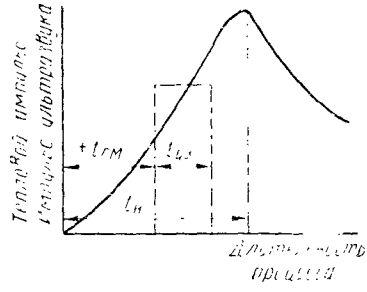


Рис. 6. Один из циклов ультразвуковой сварки с импульсным косвенным нагревом

Для монтажа транзисторов или интегральных схем с твердыми или напыленными выводными площадками на тонкопленочные или толстопленочные схемы применяют ультразвуковую сварку.

Монтаж безкорпусных приборов, имеющих твердые выводы в виде покрытых припоем контактных площадок (обычно используют сплавы олова с серебром или олова с золотом), к тонкопленочным схемам может осуществляться импульсным нагревом инструмента, с помощью которого устанавливается кристалл прибора на контактные площадки пленочной микросхемы.

СОЕДИНЕНИЕ МИКРОСХЕМ В БЛОКИ

При соединении выводов навесных элементов с печатными платами выбор способа пайки или сварки определяется конструкцией навесного элемента и монтажной платы. Навесные элементы с плоскими выводами обычно соединяют

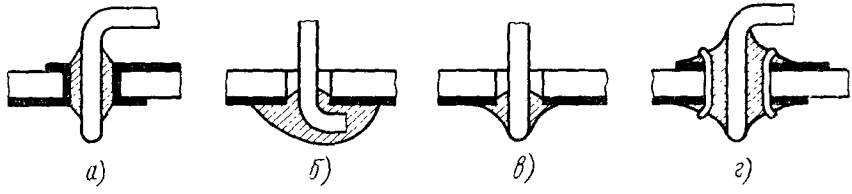


Рис. 7. Варианты пайки выводов навесных элементов к печатной плате с отверстиями: *а* — с металлизацией отверстия; *б* — с подогнутым выводом без металлизации отверстия; *в* — без подогнутого вывода; *г* — с гильзой, развальцованной в отверстии

с печатными платами без монтажных отверстий, формуя выводы таким образом, чтобы при установке элемента на плату они плотно прижимались к контактным площадкам схемы. Перед пайкой или сваркой корпусы элементов приклеивают к плате.

При монтаже некоторых навесных элементов (например: микросопротивления, миниатюрные конденсаторы и пр.) на платы можно с успехом применять

токопроводящие пасты-контактолы. Широко известны два вида контактолов К-1 и К-11 [4]. Контактол К-1 изготовляют на основе смолы ЭП-096, контактол К-11 — на основе нитролака АК 20 с добавлением 26% по весу мелкодисперсного серебра. Контактолы обеспечивают прочность склеивания не менее 10 *кГ/мм*². Удельное сопротивление контактолов составляет $3 \div 6 \cdot 10^{-6}$ *ом·м*.

Пайка остается одним из основных способов монтажа навесных элементов на печатные платы. При пайке печатных плат, когда необходимо применять малоактивные флюсы, нужно обязательно предварительно лудить соединяемые детали. Имеется несколько вариантов монтажа навесных элементов на печатные платы пайкой при закреплении выводов в отверстия платы (рис. 7). При ручной пайке, а также при пайке импульсным электронагревом одним из радикальных методов предотвращения отслоения печатного монтажа или вывода из строя интегральной схемы из-за чрезмерного нагрева является применение дозированного припоя. Припой наносится заранее в виде таблеток нужных размеров и формы, в виде пасты или путем лужения выводов и контактных площадок плат. Для присоединения плоских выводов наиболее целесообразно применять односторонюю контактную пайку с предварительным лужением выводов и контактных площадок обычными мягкими припоями. При этом методе пайки прочность соединений не уступает прочности сварных соединений, а иногда и превышает ее.

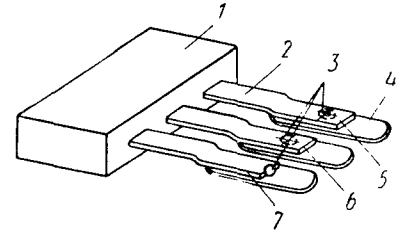


Рис. 8. Различные типы соединений выводов с печатными платами при сварке лазером или электронным лучом: *1* — навесной элемент (интегральная схема); *2* — вывод интегральной схемы; *3* — место падения луча; *4* — токоподводящая дорожка печатной платы; *5* — заклепочное соединение; *6* — точечное соединение; *7* — торцовое соединение

4. Свариваемость некоторых сочетаний материалов контактной сваркой сдвоенным электродом

Материал и толщина контактной площадки и подложки в *мкм*	Материал и размер вывода в *мкм*							
	Золото ◎ до 100	Медь без покрытия		Медь серебреная или луженая		Никель		Ковар золоченый δ до 150
		◎ до 100—120 δ до 80—100	◎ более 100 -120 δ более 80—100	◎ до 150 δ до 120	◎ более 150 δ более 100	◎ до 100 δ до 100	◎ более 100 δ более 100	
Медь δ = 20 ÷ 50 на стеклотекстолите или гетинаксе	××	×	—	××	×	—	—	×
Медь луженая на стеклотекстолите	××	××	×	××	××	×	×	×
Медь серебреная на стеклотекстолите	××	××	×	××	✓	×	×	×
Никель золоченый δ = = 50 ÷ 100 на стеклотекстолите	××	××	×	××	✓	×	×	×
Серебро вожженное δ = = 50 ÷ 150 на фотоситалле или керамике	××	×	—	××	—	—	—	×

Примечание. ×× — хорошая свариваемость; × — удовлетворительная; — — неудовлетворительная.

При сварке плоских выводов с печатными проводниками одной из серьезных проблем является нестабильность качества сварных соединений, связанная с отклонением размеров выводов, токоведущих дорожек на подложке, толщины покрытия и т. д. В связи с этим при соединении плоских выводов способом односторонней контактной сварки обязательно применяют источники питания с автоподстройкой режима по сопротивлению свариваемых деталей. Данные по конструктивной свариваемости контактной сваркой сдвоенным электродом некоторых материалов приведены в табл. 4. Для получения сварных соединений, отвечающих требованиям по прочности и надежности, ширина контактной площадки должна составлять не менее 3 - 5 диаметров или ширины привариваемого вывода, а длина 5 - 8 диаметров вывода.

При сварке навесных элементов с плоскими выводами к печатным платам лучом лазера или электронным лучом применяют три типа соединений (рис. 8): торцовое, точечное и заклепочное.

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СОЕДИНЕНИЙ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

Все методы контроля качества сварных и паяных соединений можно разбить на два основных вида: 1) испытания с разрушением соединений, проводящиеся в процессе отработки технологических режимов или при периодических испытаниях оборудования; 2) испытания без разрушения как отдельных соединений, так и готовых радиоэлектронных элементов, схем и приборов.

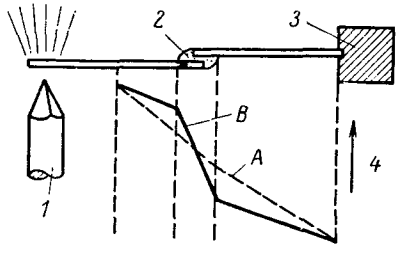


Рис. 9. Контроль точечной сварки инфракрасным методом: *1* — нагреватель; *2* — сварное соединение; *3* — теплоотвод; *4* — шкала температур

При анализе причин отказов какого-либо прибора сначала проводят все возможные типы неразрушающих испытаний, а затем уже применяют разрушающие способы контроля [11]. Основные методы выявления дефектов сварных соединений и возможные типы и причины отказов готовых приборов сведены в табл. 5.

Чтобы обеспечить высокую воспроизводимость качества сварных соединений, наиболее целесообразно проводить контрольные испытания в три этапа: испытания сварочной установки; испытания качества соединений при подборе параметров режима сварки на данной установке; периодические производственные испытания.

Для оценки качества (прочности) сварных соединений тонких проводников с пленками на плоских подложках обычно применяют испытания на растяжение двумя способами: испытание на отрыв под углом 180, 90, 45 или 30° к поверхности подложки; испытание параллельно поверхности подложки. В реальных конструкциях проводники по отношению к подложке могут иметь угол от 5—8 до 60—75°. Поэтому прочностные испытания микросварных соединений необходимо проводить под различным углом приложения нагрузки с учетом реальных условий работы соединений.

Визуальный осмотр применяют для пооперационного или выходного контроля качества паяных и некоторых видов сварных соединений. Этот способ является достаточно надежным, быстрым и экономичным. Оценка производится в сравнении с эталонным образцом. Обычно устанавливается 100%-ный визуальный контроль. Критерием оценки качества сварных микросоединений можно принять величину деформации проводника.

Для обнаружения дефектов сварных соединений в герметизированных схемах используется контроль рентгеновским излучением с напряжением до 150 *кв*.

5. Типы и причины отказов приборов и методы выявления дефектов сварных соединений

Методы и приборы для контроля	Наблюдаемый физический или механический дефект	Возможные типы отказов	Вероятные причины дефектов или механизмы отказов
Визуальный осмотр с помощью бинокулярного микроскопа с увеличением 3—120 раз	Неоднородности в соединениях (окисление, загрязнения, появление интерметаллических фаз)	Низкая прочность соединения или электрические утечки	Перегрев при технологических операциях
	Обрыв соединений	Обрывы	Перегрев или загрязнение контактной площадки перед сборкой
	Трещины вблизи выводов корпуса	Нарушение герметичности, течи	Плохое совмещение выводов при их вплавании в корпус. Несогласованность материалов или пузырьки в металлостеклянном спае
Микроскопическое исследование на металлографическом микроскопе	Плохая адгезия межсоединений и сварных соединений	Обрывы	Плохое напыление и (или) несоблюдение технологического режима сварки
	Пустоты в термокомпрессионных (сварных) соединениях	Чрезмерно большое электрическое и тепловое сопротивление соединений и недостаточная механическая прочность	Нарушение технологического режима. Загрязнения соединяемых деталей. Образование пустот вследствие эффекта Киркендалла (различие скоростей взаимной диффузии двух металлов)
	Сварка или пайка корпуса низкого качества	Нарушение герметичности корпуса	Нарушение технологии, загрязнения, неправильный подбор материалов для сварки или пайки
Микроскопическое исследование на электронном микроскопе	Поры в местах сварки	Ненадежные соединения. Появление загрязнений	Плохой контроль процесса сварки. Поры приводят к перегреву и обрывам
	Пористые продукты диффузии	Ненадежные соединения	Образуются в результате эффекта Киркендалла
Радиографическое просвечивание рентгеновскими лучами	Пустоты в местах сварки кристалла к корпусу, выводов, крышки к корпусу	Течи через корпус, обрывы выводов, разрушение кристалла	Плохой контроль процесса сварки. Возможная коррозия в зоне сварки

Продолжение табл. 5

Методы и приборы для контроля	Наблюдаемый физический или механический дефект	Возможные типы отказов	Вероятные причины дефектов или механизмы отказов
Радиографическое просвечивание рентгеновскими лучами	Трещины в кристалле или корпусе	Обрывы или утечки	Нарушение технологического процесса сварки или пайки
	Плохое совмещение соединяемых деталей (корпуса, выводов, кристалла)	Утечка, обрывы или короткие замыкания	Плохой контроль технологических процессов сборки. Плохое совмещение приводит к появлению коротких замыканий, обрывов или к получению негерметичных корпусов
Механические испытания	Низкая прочность пайки кристалла к корпусу	Перегревы, обрывы или короткие замыкания	Нарушение технологии монтажа
	Низкая прочность сварных и паяных соединений	Перегревы, обрывы выводов, ненадежные соединения	Нарушение технологии монтажа. Неправильное сочетание свариваемых или паяемых деталей
Проверка герметичности жидкостным методом	Значительные течи в корпусах	Электрические утечки, короткие замыкания, обрывы	Нарушение технологического процесса. Коррозия под действием загрязнений, попавших из атмосферы, приводит к обрывам или коротким замыканиям
Проверка герметичности с помощью радиоактивного газа или гелиевым течеискателем	Малые течи в корпусах	Неконтролируемая атмосфера в корпусе приводит к коррозии	Коррозия приводит к обрывам и коротким замыканиям
Определение характера распределения температуры с помощью инфракрасных лучей	Локальные перегревы вследствие наличия пустот в соединениях	Перегревы	Плохой контроль производства. Загрязнения соединяемых деталей
Химический анализ элементов с помощью электронного микрозонда	Анализ интерметаллических соединений	Ненадежные соединения или электрические утечки	Перегрев при технологических операциях. Неправильный выбор свариваемых металлов
	Определение продуктов коррозии	Ненадежные соединения или электрические утечки	Нарушение герметизации корпуса, наличие загрязнений
Инфракрасная микроскопия	Внутренние напряжения и дислокации в полупроводниковом кристалле	Ненадежные соединения. Утечки. Ухудшение параметров приборов	Нарушение технологии монтажа

Инфракрасный метод контроля распределения температур (рис. 9) применим в том случае, если температура объекта отличается от температуры фона, на котором он наблюдается [10]. Большой перепад температур в сварном соединении (линия *В* на рис. 9) указывает на плохое качество сварки, а линейное изменение температуры (линия *А*) свидетельствует о хорошем качестве соединения.

Метод инфракрасной термографии позволяет выявлять зоны перегрева и максимальные температурные градиенты в готовых приборах.

Испытания на герметичность готовых приборов являются одним из важных способов для оценки качества герметизации корпусов и отбраковки потенциально ненадежных приборов и схем. Негерметичность определяют по величине течи. За единицу измерений принята такая течь, при наличии которой в вакуумном объеме в 1 *л* давление возрастает на 1 *мкм* за 1 *сек*. Методы контроля герметичности делятся на косвенные и прямые. К косвенным методам относятся: испытания в камере влаги и испытания в водяной бомбе. Оценка производится путем выдержки приборов и измерения их электрических параметров. Чувствительность методов составляет 10^{-2}–10^{-4} *л·мкм/сек*.

Прямыми методами являются: испытание в горячей масляной ванне; вакуумно-жидкостной; масспектрометрический (с помощью гелиевого течеискателя); радиоактивационный (с помощью радиоактивного газа). При вакуумно-жидкостном методе приборы помещают в жидкость, а над ней создают вакуум. Выделяющиеся под действием перепада давления пузырьки газа наблюдаются визуально. Чувствительность метода 10^{-4}—10^{-5} *л·мкм/сек*. При контроле герметичности гелиевым течеискателем приборы герметизируют в атмосфере гелия или опрессовывают в камере с гелием, а затем помещают в вакуумную камеру, соединенную с течеискателем. Чувствительность метода 10^{-5}—10^{-8} *л·мкм/сек*.

Для оценки надежности готовых радиоэлектронных схем и выявления причин отказов начинают применяться новейшие методы интроскопии. Для проверки качества полупроводниковых приборов и обнаружения мест повреждения в схемах используют сканирующие электронные микроскопы. Внутренние напряжения и неоднородности в полупроводниковых кристаллах приборов с успехом можно выявить инфракрасной микроскопией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабаяниц С. С., Оськин В. П. Технология микроконтактирования. «Передовой производственный опыт», серия «Улучшение качества, повышение надежности и долговечности машин, приборов и других промышленных изделий». ЛДНТП, 1966.
2. Красулин Ю. Л., Кожевников А. П., Кузьмин В. И. Ультразвуковая сварка с импульсным косвенным нагревом элементов микросхем. «Автоматическая сварка», 1968, № 12.
3. Лоцманов С. Н., Петрунин И. Е. Пайка металлов. М., «Машиностроение», 1966.
4. Майоров С. А. Технология производства вычислительных машин. М., «Машиностроение», 1965.
5. Маслов А. А. Электронные полупроводниковые приборы. Изд. 2-е, М., «Энергия», 1967.
6. Микроэлектроника. Сборник статей под редакцией Ф. В. Лукина. Вып. I. М., «Советское радио», 1967.
7. Назаренко О. К., Истомин Е. И., Локшин В. Е. Электронно-лучевая сварка. М., «Машиностроение», 1966.
8. Николаев Г. А., Ольшанский Н. А. Новые методы сварки металлов и пластмасс. М., «Машиностроение», 1966.
9. Фролов А. Д. Соединение в конструкциях радиотехнических изделий (механические соединения). М.—Л., «Энергия», 1966.
10. Ванцетти. Обнаружение скрытых дефектов схем по инфракрасному излучению. «Электроника» (русск. перевод), 1967, т. 40, № 7, стр. 16–21.
11. Шварц. Анализ причин отказов интегральных схем. «Электроника» (русск. перевод), 1967, т. 40, № 2, стр. 21–38.
12. Назаров Г. В., Гревцев Н. В. Сварка и пайка в микроэлектронике. М., «Советское радио», 1969.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ В 3 ТОМЕ «СПРАВОЧНИК ПО СВАРКЕ»

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть
10	Табл. 5, в головке	Не менее	Не более
39	10-я снизу	$\sigma_u = 2{,}65$	$\sigma_u = 2{,}65\,\sigma$
70	Формула (18)	$\varphi = \psi \frac{J_x}{J_y} \left(\frac{h}{l_0}\right)^2 \cdot 10^5$	$\psi = \psi \frac{J_y}{J_x} \left(\frac{h}{l_0}\right)^2 \cdot 10^5$
112	Табл. 1, графа 9	ГОСТ 5058—57; ГОСТ 5058—60	ГОСТ 5058—65
		$\frac{\text{ЧМТУ}}{\text{ЦНИИЧМ}}$ 293—60; 54-58; 436-61; 854-64; 551-61	
118	Табл. 2, графа 2	Э-ХЦВМФ ЭА-4В3Б2	ЭФ-ХЦВМФЦ ЭА-4В3Б2
139	Рис. 25, 3-я сверху	$\sigma : \sigma = 1 : 1 \div 1 : 2$	$\sigma_2 : \sigma_1 = 1 : 1 \div 1 : 2$
147	Формула (2)	$\sigma_{сж} \approx \frac{P_{ус}}{2\,B}$	$\sigma_{сж} \approx \frac{P_{ус}}{2\,B\delta}$
155	Формула (15)	$P_{ус} = (1{,}6 \div 1{,}7) = \frac{q}{v_c}$	$P_{ус} = (1{,}6 \div 1{,}7) \frac{q}{v_c}$
164	3-я сверху	$\sigma = \frac{P_{ус}}{2\,l_{пр}}$	$\sigma = \frac{P_{ус}}{4\,B l_{пр}}$
207	4-я сверху	$\delta_{\min} = \frac{A}{t_{ГПХ}} + \alpha_{св} \Delta T_x$	$\delta_{\min} = A t_{ГПХ} + e_{св} (\Delta l_x)$
225	2-я снизу	$\alpha - 1230°$ С;	$\alpha - 1250°$ С;
228	8-я снизу	[51]	[5]
284	Примечание к табл. 7	разработаны и изготовлены на Уралмашзаводе	внедрены на Уралмашзаводе
287	Рис. 2, 4-я колонка справа	Оборудование для окраски	Позиция должна быть исключена
319	7-я сверху	Усилие прижима в кГ/м	Усилие прижима в кГ/см
347	Табл. 1, графа 3	19—47,1	19—45,1
348	Табл. 2, графа 2 справа, 4-я снизу	0,65	0,70
348	Табл. 2, графа 1 справа, 4-я снизу	46,5	50
337	6-я снизу	24	12
371	Формула (37)	l_B	t_B
371	13-я сверху	F_A	$F_{ф.А}$
371	Формула (39)	$F_{ф}$	$F_{фак}$
372	Формула (42) и 3-я сверху	$F_{ф}$	$F_{фак}$
373	Подрисуночный текст к рис. 7	устройство	оборудование
382	Формула (74)	$\sum$	$\sum_1^m$
385	1-я сверху	$K_э$	$k_э$
438	Формула (6)	$F_м = F_к (1 - 0{,}1\,p_0)$ ч.	$F_м = F_к (1 - 0{,}01\,p_0)$ ч.