

БАКАЛАВРИАТ

О.Г. Быковский • В.А. Фролов
В.В. Пешков

СВАРКА И РЕЗКА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Учебное пособие

ВЫСШАЯ ШКОЛА



Материалы, отмеченные знаком ,
доступны в электронно-библиотечной
системе znanium (www.znanium.com)

**Электронно-
Библиотечная
Система**
znanium.com

*Соответствует
федеральному государственному
образовательному стандарту
3-го поколения*

621.791(075)
Б.95

1 - NUSXA

БАКАЛАВРИАТ

ШКОЛА

ВЫСШАЯ

TASNIFLANDI

О.Г. Быковский • В.А. Фролов
В.В. Пешков

СВАРКА И РЕЗКА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Допущено Учебно-методическим объединением
высших учебных заведений РФ по образованию
в области материаловедения, технологии
материалов и покрытий в качестве учебного
пособия для студентов высших учебных
заведений, обучающихся по направлению
подготовки бакалавров 150100
«Материаловедение и технологии материалов»

Регистрационный номер рецензии 02/13-14 от 23.10.2013

1577215

TDTU JOSEF
ARM (KUTUBXONA)

МОСКВА • АЛЬФА-М • ИНФРА-М • 2014

УДК 621.791(075.8)

ББК 34.641

Б95

Быковский, О.Г.

Б95

Сварка и резка цветных металлов : учебное пособие / О.Г. Быковский, В.А. Фролов, В.В. Пешков. — М. : Альфа-М : ИНФРА-М, 2014. — 336 с.: ил. + доп. материалы [Электронный ресурс; Режим доступа <http://www.znanium.com>]. — (Бакалавриат).

ISBN 978-5-98281-392-3 («Альфа-М»)

ISBN 978-5-16-009683-4 («ИНФРА-М»)

Систематизируется информация о технических возможностях известных способов сварки, наплавки и резки конструкционных цветных металлов и сплавов. Приводятся сведения об электродных материалах, технологии и технике сварки, наплавки и резки при изготовлении изделий, а также характеристики современного оборудования для ручной и механизированной металлообработки.

Для студентов, обучающихся по направлению «Оборудование и технология сварочного производства». Представляет интерес для инженерно-технических работников, занимающихся созданием сварных конструкций из цветных металлов и сплавов.

УДК 621.791(075.8)

ББК 34.641

Учебное издание

Быковский Олег Григорьевич, Фролов Вадим Анатольевич,
Пешков Владимир Владимирович

Сварка и резка цветных металлов

Учебное пособие

Оформление художника *С.Б. Дьякова*; художественный редактор *А.В. Антипов*;
компьютерная верстка *А.В. Антипов*; корректор *Ю.В. Жаркова*

Подписано в печать 17.02.2014. Формат 60×90/16. Бумага офсетная.

Печ. л. 21,0. Усл. печ. л. 21,0 + 9,0 ЭБС. Уч.-изд. л. 31,19. Тираж 300 экз. Заказ № 1118

Отпечатано способом ролевой струйной печати

в ОАО «Первая Образцовая типография» филиал «Чеховский Печатный Двор»
142300, Московская область, г. Чехов, ул. Полиграфистов, д. 1

Сайт: www.chpd.ru, E-mail: sales@chpd.ru, 8(495)988-63-76, т/ф. 8(496)726-54-10

Издательский Дом «Альфа-М»; адрес: 127282, Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1
Тел./факс: (495) 363-4270 (доб. 573); e-mail: alfa-m@inbox.ru

По вопросам приобретения книг обращайтесь:

- Отдел продаж «ИНФРА-М». 127282, Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1;
тел.: (495) 363-4260; факс: (495) 363-9212; e-mail: books@infra.ru

ISBN 978-5-98281-392-3 («Альфа-М»)

ISBN 978-5-16-009683-4 («ИНФРА-М»)

© Быковский О.Г., Фролов В.А.,
Пешков В.В., 2014

© «Альфа-М» : «ИНФРА-М», 2014

ВВЕДЕНИЕ

Многие отрасли народного хозяйства используют изделия из цветных металлов и сплавов. Так, при изготовлении судов, самолетов, вагонов, автомобилей, строительных конструкций с каждым годом растут объемы использования алюминиевых сплавов, авиакосмическая техника немыслима без использования титановых и магниевых сплавов, а изделия из меди, никеля и свинца незаменимы в химической, металлургической, нефтеперерабатывающей, атомной, электротехнической и других отраслях.

Работоспособность изделий, часто находящихся в тяжелых экстремальных условиях — при повышенных и низких температурах, в агрессивных средах и т.д., во многом зависит от качества сварных однородных и разнородных соединений. Как свидетельствует опыт, по своим физико-химическим свойствам цветные металлы в значительной степени отличаются от сталей, что нужно учесть при выборе способа, сварочных материалов, технологии и техники сварки.

Существующие справочные материалы по сварке цветных металлов неполны, потому что опубликованы в отдельных журнальных статьях или изданиях 20—30-летней давности, зачастую содержат преимущественно общие вопросы по сварочному производству и не удовлетворяют сегодняшней потребности специалистов. Данное пособие рассчитано на подготовленного пользователя, в достаточной степени владеющего знаниями в области сварки и резки металлов. Приведенные в пособии данные позволят в первом приближении назначить оптимальный способ сварки, выбрать необходимые материалы, технологию и технику выполнения сварочных работ.

Основой этого пособия стали результаты исследований, опубликованные в справочниках и монографиях, которые вышли в свет в конце XX в., а также в периодических изданиях «Автоматическая сварка», «Сварщик» и «Сварочное производство» начиная с 1985 г. и по настоящее время. В последних пуб-

ликациях приведены результаты исследований научных работников из таких ведущих организаций, как ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, АНТК «Антонов», ЗМБК «Прогресс», ВИАМ и НИАТ, производителей ракетной и авиакосмической техники КБ «Южное», ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина, ГК НПП им. М.В. Хруничева, кафедр сварки Санкт-Петербургского технического университета, РГТУ им. Н.Э. Баумана, РГТУ «МАТИ» им. К.Э. Циолковского, Приазовского государственного технического университета, Запорожского национального технического университета и др. Приведены некоторые сведения о продукции, произведенной компаниями Австрии, Швейцарии и Швеции.

Безусловно, представленные рекомендации имеют ориентировочный характер и могут быть скорректированы в соответствии с конкретными условиями металлообработки.

Как стали, так и цветные металлы и сплавы можно рассматривать относительно их технологической свариваемости, разделяя их на отдельные группы (табл. В1).

К I группе относятся сварные соединения, которые можно получить без использования особенных дополнительных приемов. Такие материалы характеризуются хорошей свариваемостью.

Ко II группе относятся сварные соединения, высокое качество которых можно получить при строгом соблюдении режима сварки, использовании специальных электродных материалов, нормальной температуре, в некоторых случаях рекомендуются подогрев, проковывание швов, термическая обработка. Такие материалы имеют удовлетворительную свариваемость.

К III группе относятся сварные соединения, высокое качество которых можно получить лишь при обязательных дополнительных операциях — предварительном, а иногда и сопутствующем подогреве, проковывании швов, последующей термической обработке и т.д. Такие материалы имеют ограниченную свариваемость.

К IV группе принадлежат сварные соединения, высокое качество которых обеспечить невозможно при любых дополнительных мерах, перечисленных выше. Такие материалы имеют плохую свариваемость и не могут быть рекомендованы для изготовления сварных конструкций.

Таблица В1. Технологическая свариваемость конструкционных цветных металлов и сплавов

Марка свариваемого материала	Группа свариваемости	Рекомендованные способы сварки ¹
АД0, АД1, АМц, АМг3, АМг6, Д1, Д31, АК12, АК5М, АЛ25 серия 1400	II II III	P ³ , ПЗ ³ , НЭ ³ , ПФ, ЭШ, К, Э, Т Г ⁶ , Р ⁶ , НЭ ⁶ , ПЗ НЭ ⁶ , ПЗ ⁶ , Т
МА1, МА3 МЛ3, МЛ8	II II	НЭ ⁶ , К, ПЗ ⁶ , Г ³ НЭ ⁶ , Г ³
ВТ1-00, ВТ1-0, ВТ5	I	ПЗ, НЭ, ПФ, ЭШ, К, Т, Э
ОТ4, ВТ-20, АТ2, ВТ6, ВТ15	II	НЭ, К, Т, Э
М0, М1, М2, Бр Мц5	II	Г ² , Р ² , ПЗ, НЭ, ПФ, ЭШ, К, Т
Л63, ЛЦ63А6Ж3Мц2	II	Г ² , Р ³ , ПЗ, НЭ, ПФ, К, Т
БрАЖ9-4, БрАМц9-2	II	Р ³ , ПЗ, НЭ, ПФ, Г, К
БрКМц3-1	II	Р, НЭ, Г ³
БрОЦС5-5-5	III	Р ⁴ Г ³ , НЭ, ПФ ³ , ПЗ
БрХ 07	III	Р ³ , ПЗ ³ , ПФ
МНЖ 5-1, МНЖМц 30-1-1	I	Г, Р, НЭ, ПЗ, ПФ
НП1, НП2 Х20Н80, НМЖМц28-2,5-1,5	I	Г, Р, ПФ, НЭ, ЭШ, К
С0, С1, С2	I	Г ⁴ , Р ⁴ , НЭ ⁴ , Т
Композиты	III	НЭ ⁵ , ПЗ ⁵ , Т ⁵
Алюминий + медь	II	НЭ ⁵ , Т
Алюминий + титан	II	НЭ, Т, К
Титан + медь	II	НЭ, Т

¹ Способы сварки: Г — газовая, Р — ручная графитовым или покрытым электродом, ПЗ — плавящимся электродом в защитных газах, НЭ — неплавящимся электродом в защитном газе, ПФ — под флюсом, ЭШ — электрошлаковая, К — контактная, Э — электронно-лучевая, Т — в твердой фазе.

² Необходимы подогрев и проковка.

³ Необходим подогрев.

⁴ Рекомендуется проковка.

⁵ Через третий металл или биметалл.

⁶ Необходимы подогрев и термическая обработка.

Рекомендаций относительно использования тех или иных способов сварки следует придерживаться с учетом фактора свариваемости.

Подогрев осуществляется в печах, токами промышленной частоты или газопламенными горелками. Температура контролируется с помощью термоэлектрических пирометрических датчиков или термоиндикаторных красок согласно ТУ 133-67, ТУ 6-09-17-39-73, ТУ 6-10-1131-71 или термокарандашей по ТУ 6-10-1110-71. Погрешность измерений — около $\pm 10^\circ\text{C}$.

ГЛАВА 1 ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИКА СВАРКИ АЛЮМИНИЯ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

1.1. Сварка плавлением алюминия и алюминиевых сплавов

По объему применения в металлоконструкциях алюминий и алюминиевые сплавы занимают второе место после сталей и чугунов и используются в различных состояниях — деформированном, литом, термически обработанном и т.п.

К *деформируемым термически неупрочненным* сплавам согласно ГОСТ 4784—97 относятся: алюминий технический марок АД0 ($\geq 99,5\%$ Al), АД1 ($\geq 99,3\%$ Al), сплавы системы Al—Mn марки АМц (Mn 1,0—1,5 %, Fe 0,7 %, Si 0,6 %, ост. Al), сплавы систем Al—Mg и Al—Mg—Mn — марка АМг3 (Mg 3,2—3,8 %, Mn 0,3—0,6 %, Zn 0,2 %, Fe 0,5 %, Si 0,5—0,8 %, Ti 0,1 %, ост. Al), марка АМг6 (Mg 5,8—6,8 %, Mn 0,5—0,8 %, Zn 0,2 %, Fe 0,4 %, Si 0,4 %, ост. Al), сплавы системы Al—Cu—Mn марки 1201 (Si 0,20 %, Fe 0,30 %, Cu 5,8—6,8 %, Mn 0,20—0,40 %, Mg 0,02 %, Zn 0,10 %, Ti 0,02—0,10 %, Zr 0,10—0,25 %, ост. Al), сплавы системы Al—Zn—Mg марки 1915 (Si 0,35 %, Fe 0,4 %, Cu 0,1 %, Mn 0,2—0,7 %, Mg 1,0—1,8 %, Cu 0,06—0,20 %, Zn 4,0—5,0 %, Ti 0,01—0,06 %, Zr 0,08—0,2 %, ост. Al) и т.п., деформируемые термически упрочняемые сплавы системы Al—Mg—Si марки АД31 (Mg 0,4—0,9 %, Mn 0,1 %, Zn 0,1 %, Fe 0,35 %, Si 0,2—0,6 %, Ti 0,11 %, ост. Al), системы Al—Cu—Mg марки Д1 (Mn 0,4—1,0 %, Mg 0,4—0,8 %, Cu 3,5—4,5 %, Fe 0,7 %, Si 0,2—0,8 %, Cr 0,1 %, Zn 0,25 %, Ti 0,15 %, ост. Al) и т.д.

В последние годы все большее распространение находят сплавы алюминия, легированные литием: Al—Mg—Li, Al—Cu—Li, Al—Cu—Mg—Li. Их удельный вес ($\gamma = 2,47$ г/см³) меньше, чем у других алюминиевых сплавов, благодаря чему

можно снизить общий вес металлоконструкции почти на 20 %. Это сплавы серии 1400, из которых наиболее изучен 1420 (Li 1,8–2,1 %, Mg 4,9–5,5 %, Zr 0,15 %, ост. Al). Из них изготавливают полуфабрикаты — листы, штампованные заготовки, прессованные профили разнообразных форм и размеров.

Литейные сплавы согласно ГОСТ 1583–93 также разделяются на несколько групп по системам легирования: система Al–Si марки АК12 (АЛ2) (Si 10–13 %, ост. Al), система Al–Si–Cu марки АК5М (АЛ5) (Mg 0,35–0,6 %, Si 4,5–5,5 %, Cu 1,0–1,5 %, ост. Al) и т.п. Из этих сплавов отливают фасонные изделия, их используют для заварки дефектов литья или ремонта поврежденного при эксплуатации изделия.

Тугоплавкая ($T_{пл} = 2050\text{ }^{\circ}\text{C}$) и **нерастворимая в жидком алюминии** ($T_{пл} = 660\text{ }^{\circ}\text{C}$) **оксидная пленка** Al_2O_3 , образующаяся при сварке плавлением, засоряет сварочную ванну и способствует появлению пористости. Пленка может быть причиной микротечей и возникновения газопроводных каналов, которые под действием малоциклового растяжения превращаются в сквозные, а в сплавах серии 1400 они образуются в виде нитеподобных включений. Структура и толщина (может различаться в 4–24 раза) оксидных пленок зависит от химического состава сплава и во всех случаях является источником концентраторов напряжений, снижающих служебные характеристики металлоконструкции.

Борьба с пленкой ведется как на стадии предварительной подготовки поверхности под сварку, так и во время сварки за счет выбора параметров режима и сварочных материалов.

На первом этапе при изготовлении сравнительно неотчетливых крупногабаритных листовых конструкций оксидную пленку со свариваемых кромок и околошовной зоны удаляют механическим путем щетками из нержавеющей проволоки диаметром не более 0,15 мм или шабером.

Для ответственных конструкций необходимая подготовка включает химическую обработку основного и присадочного металла, который обеспечивает уничтожение старой и образование новой пленки оксидов небольшой равномерной толщины.

Особенно тщательно нужно обрабатывать присадочную проволоку, с которой в сварочную ванну поступает почти в

10 раз больше оксидов и других загрязнений. Для уменьшения их количества используют проволоку максимально большого диаметра, а саму проволоку подвергают электролитическому полированию.

Существующие химические методы для снятия оксидной пленки предполагают применение щелочных и кислотных растворов различных составов.

Технология травления в щелочных растворах состоит из следующих этапов:

- 1) травление 1–5 мин в 10%-ном растворе NaOH или KOH при температуре 50–70 °С или 2–5 мин в растворе (в % по массе): едкий натр — 1, фосфорнокислый натрий — 5, вода — 94 при температуре 70 °С;
- 2) промывание в горячей воде;
- 3) осветление в 10%-ном растворе азотной кислоты для нейтрализации остатков щелочи и удаления с поверхности продуктов реакции алюминия с щелочью; температура осветления — комнатная, время выдержки до 1 мин;
- 4) промывание в горячей воде и протирка волосяными щетками;
- 5) просушка при температуре 40–70 °С до полного удаления влаги.

Травление в кислотных растворах используется для обработки сплавов алюминия — силуминов, дюралюминия и проч., при травлении которых щелочами образуется черный налет, и осуществляется разными составами, например (% по массе): ортофосфорная кислота — 25, двухромовокислый калий — 0,5, вода 74,5; температура травления 30–45 °С, длительность 10–15 мин. После травления осуществляются промывание в холодной проточной воде, протирка мягкими щетками и сушка в струе подогретого воздуха.

Сварка подготовленных таким образом деталей должна быть выполнена на протяжении 16 ч. Сварочную проволоку после химической обработки можно хранить на открытом воздухе не больше 12 ч, а в герметичной таре не больше 36 ч. Неиспользованную проволоку разрешается без предварительного обезжиривания подвергать химической обработке не более 2 раз.

Травление проводят в ваннах из нержавеющей стали, стабилизированной молибденом. Необходимо строго следить за чистотой рук и рабочих рукавиц.

Операция подготовки кромок к сварке значительной производительности заключается в специальной магнитно-абразивной зачистке, когда на обрабатываемую поверхность воздействует порошковая ферромагнитная абразивная масса, состоящая из режущих зерен и уплотняемая энергией магнитного поля.

Применяются ферромагнитные абразивные порошки зернистостью 100–315 мкм различных составов (Fe 60 %, TiC 40 %; серый чугуn, ферромагнитный корунд и др.). Для повышения эффективности действия их смешивают со смазочно-охлаждающими жидкостями — водными растворами поверхностно-активных веществ (1 % триэтаноламина, 1 % олеиновой кислоты и 1 % глицерина, остальное вода). Эта смесь удерживается силами магнитного поля между вращающимися чашевидными полюсными наконечниками и при постепенном движении кромок пластины обеспечивает зачистку одновременно с торца и по двум боковым поверхностям.

Режим обработки характеризуется следующими параметрами: рабочий зазор 1,5 мм, магнитная индукция $B = 0,5$ Тл, частота вращения полюсных наконечников 172 м/мин, скорость продольной подачи листов 165 мм/мин, число проходов 2, ширина обработанной зоны 10 мм. Качественно обработанная поверхность имеет светлый цвет с матовым оттенком.

В случае длительных циклов выполнения сборочно-сварочных работ оптимальным способом подготовки сплавов алюминия к сварке считается термовакуумная обработка: для сплавов серии 1400 проводится при 470 ± 10 °С, выдержка в вакууме 2–3 ч; для сплавов серии 1150, АМг6 — при 450 ± 10 °С, 1,5–2 ч; для сплава 1201 — при 400 ± 10 °С, 1–1,5 ч. Такая обработка способствует термической диссоциации водородосодержащих фаз, удалению газов из микронесплошностей и из твердого раствора.

Дальнейшее высокоскоростное фрезерование и нанесение на кромки специального неметаллического покрытия типа ХВ-139 позволяют сохранить их свойства в течение 30 суток.

Второй этап борьбы с оксидной пленкой проходит в сварочной ванне: пленка разрушается за счет действия сварочной дуги (катодное распыление) или вследствие химической реакции между пленкой и компонентами флюсов или покрытий,

содержащих хлористые и фтористые соли щелочно-земельных металлов, которые вступают в реакцию с пленкой, разрыхляют, разжижают ее и переводят в легкоплавкий шлак.

Эффективное удаление пленки осуществляется за счет создания специальных гидродинамических условий движения жидкого металла в сварочной ванне, что обеспечивается путем наложения на дугу кратковременных мощных импульсов, использования асимметричного разнополярного тока со сменой его амплитуды в период обеих полярностей или путем увеличения тока только в период прямой полярности. Так, в общем цикле 20 мс для качественной катодной очистки достаточно иметь 3–5 мс длительности обратной полярности. При этом снижается тепловая нагрузка на вольфрамовый электрод, который лучше работает на прямой полярности. В то же время чрезмерная очистка ванны от оксидной пленки ухудшает повторное зажигание дуги, она «задыхается», что свидетельствует о полной очистке сварочной ванны от пленки.

Подогрев сварочной проволоки до 150–200 °С непосредственно при сварке на длине до 100 мм также является эффективным способом. Он предотвращает охлаждение участка сварочной ванны в месте подачи проволоки, повышение и выравнивание температуры по всей ее поверхности, что содействует более полному катодному разрушению пленки.

Для исключения образования оксидных пленок в корне шва, уменьшения пористости и содержания газов в сварном шве эффективно применение специальных *флюсов-суспензий*, содержащих модификаторы (фторбораты и фторцирконаты калия МАТИ-6, ТФА-5), которые наносятся в корень шва и на боковые поверхности свариваемых деталей. При этом увеличивается поверхностное натяжение расплавленного металла в корне шва, что важно при сварке труб «на весу», упрощаются отделение оксидных пленок от подложки и выведение их в шлак, дегазация и рафинирование сварочной ванны.

Пористость сварных швов связывается со скачкообразным уменьшением растворимости прежде всего водорода и других газов при переходе металла из жидкого состояния в твердое и обусловлена причинами металлургического и технологического характера. Дефекты в виде пор, микровздутий и трещин воз-

никают вследствие плохой металлургической наследственности, когда поверхностные слои насыщаются не только водородом, но также оксидом и диоксидом углерода и углеводородами, что наблюдается при выплавке сплавов в газопламенных печах. Алюминиевые сплавы серии 1400 особенно склонны к пористости в зоне сплавления с основным металлом из-за выделения углеводородных и литиевых соединений как с поверхности, так и из основного металла впереди фронта плавления, которое продолжается в сварочной ванне. В зоне сплавления и корне шва условия выделения пузырей стесненные, время всплытия пузырей больше времени существования ванны в жидком состоянии, поэтому образуются цепочки пор, а толщина газонасыщенных слоев составляет 0,03–0,1 мм.

В связи с этим перед сваркой сплавов серии 1400 удаляют поверхностный слой на глубину до 0,2 мм, а содержание водорода в основном металле должно быть не более 0,7 см³/100 г. Для борьбы с подповерхностными порами применяют термовакуумную обработку заготовок перед сваркой, зазор при сборке металла толщиной 1–3 мм должен быть в пределах 0–0,05 мм, для толщин 4–6 мм – не больше 0,7 мм, а прихватки нужно выполнять с полным проплавлением при минимальном их числе.

С учетом сказанного выше для сварных конструкций из этих сплавов нужно использовать только металл, полученный вакуумно-индукционной плавкой, с вакуумным миксером и разливкой в инертной атмосфере. Для гарантированного получения сварных швов с минимальной пористостью при сварке на отливках пористость последних должна быть не более 2 баллов по ОСТ 1.90029–79, а при изготовлении литоштампосварных конструкций пористость на отливках не должна превышать 1 балла.

Необходимо также соблюдать требования к срокам хранения деталей и проволоки до сварки. Так, после шабрения срок хранения составляет 5 ч, 3 месяца после удаления газонасыщенного слоя на глубину 0,2 мм, 12 месяцев после термовакуумной обработки. Присадочная проволока может храниться: 16 ч после химического полирования в открытой кассете, 38 ч в полиэтиленовом чехле, 120 ч в герметичной таре в инертных газах.

На склонность к пористости оказывают влияние расход защитного газа и его минимальное давление, при которых пористость отсутствует.

Подбором защитных газов и составов газовых смесей можно активно управлять порообразованием. Так, при сварке сплавов АД0, АМг5, АМг6 с использованием сварочных проволок СвА5, СвАМг6 беспористые швы легче получить при сварке в газовых смесях: для сплава АД0 в смеси 25–30 % Ar + 75–70 % He, а для сплава АМг6 – в смеси 55–45 % Ar + 45–55 % He.

Для улучшения условий выхода газовых пузырей применяют предварительный и сопутствующий подогрев, например не более 100 °С для сплава АМг6, 100–200 °С для сплава АД0.

Скорость охлаждения алюминиевых сплавов также влияет на пористость, что определяется содержанием в них магния. Так, для чистого алюминия она должна быть меньше 50 °С/с, а для сплава АМг6, наоборот, больше 50 °С/с, так как при большом времени существования сварочной ванны увеличивается объем β -фазы, что приводит к образованию рыхлот и несплошностей. Как и в случае борьбы с оксидной пленкой, целесообразно использовать пульсирующую дугу асимметричного разнополярного тока прямоугольной формы, что создает условия для интенсивного перемешивания сварочной ванны и своевременного зарождения, срастания и удаления пузырей. Надо сказать, хорошо очищенная от оксидных пленок сварочная ванна всегда будет обеспечивать получение беспористого шва.

Уменьшение погонной энергии, электромагнитное перемешивание сварочной ванны также существенно снижает склонность к порообразованию.

Температура и влажность в помещении также оказывают влияние на пористость, что связано с образованием конденсата на поверхности металла. Поэтому сборочно-сварочные работы можно выполнять только при температуре не ниже 10 °С при отсутствии сквозняков и потоков воздуха, ухудшающих защиту плавильного пространства.

Наличие внутренних дефектов в виде оксидных пленок и пористости в сварных швах у сплавов, например, серии 1400 в количестве 1–2 % площади рабочего сечения снижает показатели прочности: оксидные пленки на 10–15 %, поры на 3–10 %.

Поэтому в сварных швах допускаются дефекты в виде пор не более 5 %, а в виде оксидных пленок не более 3 %.

Образование горячих трещин обусловлено действием металлургических и технологических факторов. Первые обычно связываются с совместным влиянием содержания железа и кремния, образованием эвтектик в высоколегированных сплавах, при сварке разноименных алюминиевых сплавов и т.п. Горячие трещины возникают при температуре ниже солидусной в верхней части эффективного интервала кристаллизации вследствие действия нормальных напряжений. Они зарождаются в чистом алюминии по границам вторичных кристаллов, а в его сплавах — в зонах срастания первичных кристаллов и по границам дендритов за счет локализации деформации в узких приграничных зонах. В них накапливаются легирующие элементы и вредные примеси, протекают структурные превращения, возникают межзеренные расслоения, что обуславливает высокую степень ограничения пластической деформации. Для сплавов серии 1400 характерно образование горячих трещин не только посередине сварного шва и в зоне сплавления с основным металлом, но и непосредственно в околосшовной зоне основного металла, подверженного термическому влиянию. Они образуются в виде микрорыхлот в местах оплавления пограничных выделений и отдельных грубых включений интерметаллидов при дальнейшей кристаллизации расплава в замкнутых объемах.

Для предупреждения горячих трещин при сварке низколегированных сплавов, например АМг2, нужно использовать проволоку типа СвАМг5 с повышенным содержанием магния, что уменьшит неоднородность его распределения и склонность к образованию трещин. При этом содержание примесей железа, кремния и меди, как и соотношение Fe/Si, нужно всячески снижать, а в сплавах серии 1400 уменьшать содержание магния и лития, которые в полуфабрикатах образуют эвтектики и ликвационную неоднородность с участками, богатыми магнием и литием. Эффективным способом борьбы с горячими трещинами при одновременном повышении пластических свойств сварного шва является введение в сварочную ванну элементов модификаторов — циркония, титана, а также совме-

стно Ti+Be и Ti+Zr и особенно скандия. Они ограничивают или исключают низкотемпературный интервал кристаллизации сварного шва, снижают число грубых интерметаллидных фаз, уменьшают протяженность межкристаллитных трещин, измельчают структуру. Так, для улучшения свариваемости алюминиево-магниевого сплава разработаны специальный сплав 1423 (Li 1,8–2,2 %, Mg 3,2–4,2 %, Zr 0,06–0,10 %, Sc 0,10–0,20 %), а также сварочная проволока Св01597, содержащая до 0,5 % Sc. Это позволяет почти в 3 раза снизить склонность к горячему трещинообразованию и повысить прочность металла шва на 20 %.

Полезно также применение упомянутых выше флюсовых композиций, наносимых в виде пасты на лицевую и обратную стороны свариваемых листов в сочетании с действием внешнего магнитного поля с индукцией до 20 мТл. Такого же эффекта можно добиться за счет колебания сварочной ванны при сварке неплавящимся электродом с подачей в плавильное пространство присадочной токоведущей проволоки. В результате взаимодействия магнитных полей, образованных этими составляющими, дуга отклоняется от вертикального положения, что вызывает периодические колебания расплавленного металла и способствует формированию более однородной мелкокристаллической структуры, что в свою очередь прекращает распространение трещины.

Добавки 0,2–0,4 % Sc в алюминиевый сплав В96 позволяют обеспечить пластические свойства зоны термического влияния благодаря созданию мелких интерметаллидных упрочняющих частиц, тормозящих охрупчивание эвтектической прослойки в условиях отжига при $T = 360^\circ\text{C}$ и коагуляции неметаллических включений.

Для сварки сплавов 1440, 1450, 1460 рекомендуется применять проволоку марки Св1217, а для сплавов 1430, 1470 – проволоку марки Св1177.

Таким образом, путем улучшения структурного состояния границ кристаллитов и зерен можно избежать образования хрупких участков и реально управлять прочностью и вязкостью сварных соединений из сплавов серии 1400. Кроме того, для защиты плавильного пространства рекомендуется использование Ag–He-смесей, флюсов, для защиты проплава и зоны

сплавления специальных сопл и поддувов целесообразно выполнять автоматическую сварку асимметричным разнополярным током.

Сплав 1424 — это улучшенная модификация сплава 1420. За счет дополнительного легирования цинком и скандием при одновременном снижении содержания лития и магния обладает хорошей свариваемостью; для его сварки используют проволоки систем Al—Mg—Sc (Св1597) и Al—Mg—Sc (Св1598). Прочность сварного шва составляет 0,75—0,80 прочности основного металла при высоком уровне пластичности. Дополнительная термическая обработка (закалка + искусственное старение) повышает прочность до 0,95 прочности основного металла.

Подварка сварных швов на изделиях из сплава 1420 ведет к структурным превращениям в зоне сплавления. Под воздействием вторичных нагревов по границам зерен образуется сетка из хрупких фаз. Поэтому подварку нужно осуществлять с минимальным тепловложением вручную вольфрамовым электродом в аргоне или плазмой.

Сварка термообработанных сплавов в отожженном состоянии и полная термическая обработка после сварки обеспечивают снижение склонности к трещинообразованию.

В случае необходимости изготовления конструкций из разноименных сплавов, в том числе литодеформированных, наилучшим сочетанием свойств и наименьшей склонностью к горячему трещинообразованию имеют следующие комбинации сплавов: ВАЛ16+АМг6, ВАЛ16+1420, ВАЛ8+АМг6, ВАЛ14+АМг6, АЛ2+АМг6, АЛ2+АМг3, 1420+АМг6, ВАЛ16+01570, ВАЛ 19+АМг6, ВАЛ19+1420, ВАЛ19+01570. Прочность таких соединений составляет 80 % этого показателя металла отливки, высокое качество соединений достигается при литье в металлические формы.

При сварке сплавов с разной системой легирования, например ВАЛ16+1420, слабым местом соединения является высокотемпературная область зоны термического влияния со стороны отливки, где нарушается герметичность из-за выделения наследственных газов через несплошности. Поэтому следует использовать сопла с большим диаметром на срезе, что уменьшает окисление поверхностных слоев зоны термического влияния. Рекомендуется также смешивать защитный газ ар-

гон с 1–5 % сернистого газа или 0,5–3 % гексафторида серы, что обеспечит создание защитного слоя оксидов, препятствующего возникновению подповерхностных сетчатых газоусадочных рыхлот, через которые осуществляется вытеснение газов и жидкого металла из основного металла в сварочную ванну.

Холодные трещины образуются при температурах ниже 200 °С и характерны для сварки деформируемых и литейных термически упрочняемых сплавов со сложными системами легирования. Эти трещины имеют транскристаллитную направленность и возникают у сплавов с малым запасом пластичности, когда влияние усадочных и сварочных напряжений становится значительным в процессе охлаждения сварных швов. Поэтому желательно эти напряжения выносить в зону, не подверженную высокому нагружению, улучшать качество сборки (минимальные зазоры, по возможности без прихваток, в жестких кондукторах, центраторах, обеспечивать натяг в зоне стыка для создания сжимающих напряжений). Полезным может быть предварительный или промежуточный отжиг.

При ремонте крупного литья с толщиной стенки более 8–10 мм для уменьшения теплоотвода следует применять только общий предварительный или сопутствующий подогрев до 250–300 °С. При сварке небольших тонкостенных конструкций трудно контролировать границы холодного и нагретого металла, вследствие чего увеличивается вероятность прожогов и провалов из-за резкого падения прочности свариваемого металла при нагреве выше 400 °С, что характерно для сварки «на весу». В этом случае нужно увеличивать скорость сварки и подачи электродной проволоки или уменьшать сварочный ток.

При ручной сварке решение проблемы требует повышения квалификации сварщика, при механизированной – точной настройки параметров режима, сварки по отбортовке, применения подкладок, формирующих обратную сторону шва, и т.п. С целью повышения усталостной прочности рекомендуется снимать усиление шва и его проплав, а также производить высокочастотную проковку сварных швов в зонах перехода на основной металл, которую нужно выполнять с меньшей интенсивностью наклепа по сравнению с этой процедурой для стали, используя бойки диаметром 5 мм.

В зависимости от марки основного металла для сварки одноименных и разноименных алюминиевых сплавов разработаны присадочные проволоки (табл. 1, 2). Сварка некоторых сплавов выполняется проволоками, не вошедшими в ГОСТ 7871-75, например сплав 1151 сваривается проволокой 1177, сплав 01570 — проволоками Св01597, Св01570, сплавы 1460, 01460-1 — проволокой Св1207.

Металл шва, наплавленный некоторыми проволоками в соответствии с ГОСТ 7871-75, модифицирован бериллием и цирконием; в проволоках иностранного производства для этой же цели используют хром, но во всех случаях количество примесей железа и кремния не превышает 0,6 и 0,4 % соответственно при соотношении $Fe/Si < 1$.

1.2. Газовая сварка алюминия и алюминиевых сплавов

Газовая сварка алюминия и его сплавов (табл. 1.1-1.3) осуществляется мягким ацетиленокислородным пламенем проволокой необходимого состава с применением флюсов, состоящих из хлористых и фтористых солей щелочно-земельных металлов на параметрах режима, указанных в табл. 3, 4.

Таблица 1.1. Флюсы для газовой сварки алюминиевых сплавов

№ флюса	Состав, % (по массе)							
	KCl	NaCl	LiCl	KF	Na ₂ SO ₄	Na ₃ AlF ₆	CaCl ₂	NaF
1	45	30	15	7	3	—	—	—
2	45	30	15	10	—	—	—	—
3	50	15	—	—	—	35	—	—
4	50	30	—	—	—	20	—	—
5	45	20	—	—	—	—	20	15
6	50	28	14	—	—	—	—	8

Наиболее распространен флюс № 6, известный под маркой АФ-4А.

Таблица 1.2. Параметры подготовки кромок и сборки деталей из алюминия и его сплавов

Вид соединения	Толщина деталей, мм	Притупление, мм	Зазор, мм	Угол искоса кромок α°	Прихватки, мм		
					Расстояние	Высота	Длина
Стыковое	1,5–3,0	—	1–2	—	20–50	1,5–2,5	4–6
	3,0–5,0 и больше	1,5–2,0	1,5–5,0	60–70	80–300	4–20	8–60
Угловое	До 1,5	—	0,3–0,5	—	20–30	1,5	2–4
	3,0–1,5 и больше	1,0–1,5	1,0–2,0	50–60	80–250	4–20	8–60
Тавровое	До 1,5	—	0,3–0,5	—	20–30	1,5	2–4
	3,0–1,5 и больше	1,0–2,0	1,0–2,0	40–60	80–250	4–20	8–60

Основным видом соединений при газовой сварке алюминия и его сплавов является стыковое, а тавровое и внахлестку используют реже вследствие затрудненного удаления остатков флюса и шлаков.

Таблица 1.3. Ориентировочные параметры режима газовой сварки алюминия и его сплавов

Толщина металла, мм	№ накопечника горелки	Диаметр присадочного прутка, мм	Давление кислорода, МПа	Расход ацетилена, л/ч	Способ сварки
До 1,5	0–1	1,5–2,5	0,15	50–100	Левый
1,5–3,0	1–2	2,5–3,0	0,20	100–200	То же
3,0–5,0	2–3	3,0–4,0	0,20–0,25	200–400	— « —
5,0–10,0	3–5	4,0–6,0	0,25–0,30	100–700	Правый
10,0–15,0	3–6	5,0–8,0	0,30–0,35	700–1200	То же
15,0–25,0	5–6	5,0–8,0	0,35–0,40	900–1200	— « —
Более 25,0	5–6	8,09–10,0	0,40–0,60	900–1200	— « —

Избыток ацетилена способствует возникновению пористости, а употребление окислительного пламени приводит к образованию пленки оксида. Сварка ведется в нижнем положении, по возможности за один проход (до 4 мм толщины), быстро. Сварку пластин следует начинать, отступив на 80–100 мм от края, и вести процесс обратноступенчатым методом, т.е. пропущенный участок заваривать в обратном направлении. Детали толщиной более 10 мм нужно подогревать до 300–350 °С. После сварки рекомендуется легкое проковывание шва в холодном состоянии.

Газовая заварка дефектов шва и литья из силумина (трещины, усадочные и газовые раковины, рыхлоты и т.п.) — один из распространенных универсальных методов ремонтных работ. Метод реализуют в виде нескольких этапов:

- 1) осуществляют разделку дефекта под заварку с помощью сверл, пневмозубил, шарошек и т.п. под V-образное соединение с углом раскрытия 90° и заovalением полученной канавки;
- 2) засверливают концы трещины сверлом диаметром 6–8 мм: при сквозной трещине на всю глубину, а при несквозной — на 2–3 мм больше глубины трещины;
- 3) обязательно нагревают все изделие до температуры 200–250 °С пламенем горелки (малогабаритные детали) или в электрических печах (крупногабаритные отливки);
- 4) расплавляют кромки так, чтобы ядро пламени находилось на расстоянии 3–5 мм от поверхности расплавленного металла, в который погружается присадочный пруток; угол наклона мундштука горелки к поверхности должен быть 40–60° при толщине детали до 5 мм и 60–80° при большей толщине, а присадочный пруток подается в зону сварки под углом 40–60°;
- 5) заваривают дефект от середины к краям участками длиной 60–70 мм поочередно в одну и другую сторону;
- 6) обеспечивают медленное охлаждение отливки, закрыв ее асбестом и горячим песком или погрузив ее в нагретую печь;
- 7) осуществляют проковку наплавленного металла совместно с отжигом отливки при температуре 300–350 °С;
- 8) выдерживают ее в печи 2–5 ч для снятия остаточных напряжений и улучшения механических свойств сварного соединения;
- 9) для обеспечения коррозионной стойкости сварного соединения не позже 1 ч после сварки удаляют остатки флюса и шлака

стальной щеткой и последующей промывкой 2%-ным водным раствором хромовой кислоты при 80 °С, потом водой, после чего просушивают.

В целом механические свойства сварных соединений при газовой сварке ниже, чем у основного металла; но этот простой и доступный способ сварки широко используется при изготовлении алюминиевых конструкций неотвественного назначения.

Дуговая сварка графитовым электродом, как и предыдущий способ, предполагает использование тех же присадочных материалов и флюсов на параметрах режима, приведенных в табл. 1.4. Техника сварки у этих способов одинаковая. При сварке электротехнических шин, вводов и других малонагруженных деталей она обеспечивает необходимые прочностные и электропроводные свойства.

Таблица 1.4. Ориентировочные параметры режима сварки алюминия графитовым электродом

Толщина металла, мм	$d_э$, мм	$d_{прис.}$ мм	$I_{св.}$ А
3–4	8	4–5	120–200
4–7	10	4–5	200–280
7–10	15	6–8	280–370
10–15	15	8–12	370–500

1.3. Ручная дуговая сварка

Ручная дуговая сварка покрытым электродом используется в основном при изготовлении малонагруженных конструкций из технического алюминия и его сплавов типа АМг и АМц в монтажных условиях, а также при заварке дефектов литья из силумина.

Стыки собираются с зазором 0,5–1 мм. Металл толщиной до 12 мм не требует разделки кромок, для больших толщин рекомендуется V-образная разделка с углом 70–90°, притуплением 3–5 мм и зазором 1,5–2 мм. Тавровые и угловые соединения

необходимо собирать и сваривать без зазора, по возможности, «в лодочку». Сварка выполняется электродами, имеющими стержень соответствующего состава и покрытие из хлористых и фтористых солей щелочно-земельных металлов (табл. 3). Покрытия склонны к влагопоглощению, поэтому их нужно хранить в герметичной таре.

Сварку ведут на постоянном токе обратной полярности на стальных подкладках; параметры режима приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5. Ориентировочные параметры режима сварки стыковых швов алюминия и его сплавов вручную покрытыми электродами

Вид подготовки кромок	Толщина металла, мм	d_3 , мм	$I_{св}$, А	Температура предварительно-го подогрева, °С	Число слоев
Без разделки	3–5	3,2	80–100	100	1
	4–10	4	100–130	150	2–3
	8–14	5	130–160	200	3–4
V-образная разделка	14–18	6–8	200–400	250–300	2–3
V-образная или X-образная разделка	20–25	8	450–650	300–350	3–5
	35–40	8	500–650	350–400	6–8

Для сварки алюминия и сплавов АМг и АМц рекомендуются электроды марок ОЗА-1, ОК96.10, ОК96.20, УАНА-1, а для сварки силуминов — электроды марок ОЗА-2, ОК96.40, ОК96.50, УАНА-2. Прихватку кромок осуществляют на деталях, предварительно подогретых до 200–250 °С, а при сварке температуру повышают до 300–400 °С, при этом дуга горит мягко с небольшим разбрызгиванием металла. При сварке длинных швов металл подогревают на расстоянии 100–200 мм впереди дуги одной газовой горелкой или несколькими. При небольших размерах конструкции подогрев необходим только перед началом сварки.

Поскольку алюминиевый электрод расплавляется в 2–3 раза быстрее стального, скорость сварки должна быть тоже больше. Сварку нужно вести до полного расплавления электрода, так как образующийся на его торце шлак затрудняет по-

вторное зажигание дуги. Околошовную зону зачищают от брызг, а прихватки и нижележащие слои тщательно зачищают от шлака; после сварки остатки шлака смывают теплой водой и протравливают поверхность 5–10%-ным раствором азотной кислоты.

Иногда для повышения коррозионной стойкости швов и всей конструкции выполняют ее пассивацию — 3–5 ч обрабатывают 0,5%-ным раствором едкого натра, после чего промывают водой и освещают 5%-ным раствором азотной кислоты в течение нескольких часов. Потом конструкцию промывают водой и заполняют рабочим продуктом сниженной концентрации, разбавленным дистиллированной водой. В продукте растворяют специальные вещества, замедляющие коррозию, — ингибиторы. При этом образуется особенно прочная защитная пленка оксидов, которая повышает стойкость конструкции против действия концентрированной агрессивной среды. Пассивацию осуществляют как методом налива, так и методом орошения — распылением рабочих растворов специальными устройствами.

Ручная дуговая сварка вольфрамовым электродом ведется в основном током промышленной частоты и пульсирующим током прямоугольной формы, последний обеспечивает смену амплитуды импульсов прямого и обратного тока, а также их требуемую длительность.

Действие пульсирующего тока проявляется в периодическом углублении сварочной ванны, интенсивном перемешивании потока жидкого металла в ее нижней части, измельчении оксидных пленок (их протяженность уменьшается втрое) и вынесении их на поверхность, где они разрушаются под действием дуги, что существенно влияет как на процессы дегазации, так и кристаллизации сварного шва. Пульсация дуги обеспечивается при асимметрии переменного тока благодаря низкочастотной модуляции сварочного тока или путем изменения амплитуды импульсов на прямой полярности.

Ручная дуговая сварка целесообразна при изготовлении металлоконструкций из алюминия и его сплавов с толщиной стенки до 10–12 мм. Металл толщиной до 3 мм сваривается за один проход на стальной подкладке; при толщине металла

4—6 мм сварку выполняют с двух сторон, а начиная с 6—7 мм используют V- или X-образную разделку кромок с параметрами согласно ГОСТ 14806—80. Марки вольфрамовых электродов и токовые нагрузки на них приведены в табл. 1.6, 1.7.

Таблица 1.6. Марки и номинальные размеры вольфрамовых электродов по ГОСТ 23949—80

Марка электрода	Присадки в вольфраме	Диаметр, мм	Цвет маркировки
ЭВЧ	Без присадок	0,5; 1; 1,6; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 8; 10	—
ЭВЛ	1,1—1,4 % оксида лантана	1; 1,6; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 8; 10	Черный
ЭВИ-1	1,5—2,3 % оксида иттрия	2; 3; 4; 5; 6; 8; 10	Синий
ЭВИ-2	2—3 % оксида иттрия	2; 3; 4; 5; 6; 8; 10	Фиолетовый
ЭВИ-3	2,5—3,5 % оксида иттрия, 0,01 % тантала	2; 3; 4; 5; 6; 8; 10	Зеленый
ЭВТ-15	1,5—2 % оксида тория	2; 3; 4; 5; 6; 8; 10	Красный

Таблица 1.7. Максимальные токовые нагрузки, А, для вольфрамовых электродов разных марок

Диаметр электрода, мм	Постоянный ток, прямая полярность			Переменный ток, А		
	ЭВЛ	ЭВИ	ЭВТ	ЭВЧ	ЭВЛ	ЭВИ
2	80	180	120	—	—	—
3	230	380	300	150	150	180
4	500	620	590	180	170	220
5	720	920	810	210	210	270
6	900	1500	1000	250	250	340
8	—	—	—	360	380	480
10	—	—	—	450	520	650

Наиболее широко применяют лантанированные и иттрированные электроды, так как они менее токсичны, чем торированные; оксиды редкоземельных металлов обеспечивают большую стабильность горения дуги.

При работе на постоянном токе электроды затачивают на конус с небольшим притуплением, при работе на переменном токе электроды марок ЭВИ и ЭВЛ должны иметь плоскую заточку, а марки ЭВЧ — заточку под сферу.

Чтобы повысить эрозионную стойкость вольфрамового электрода и глубину провара металла, торцу электрода придают тороидальную форму (в продольном сечении это фигура полутора). Такая довольно сложная форма рабочей поверхности электрода способствует электромагнитному сжатию и самофокусировке плазмы дуги.

Для повышения стойкости вольфрамового электрода и лучшей стабилизации анодного пятна сварки используют композиционный электрод, в котором вольфрамовая вставка углублена в медном наконечнике, а ее торец имеет коническую заточку с углом $90-120^\circ$. При использовании таких биметаллических электродов Cu—W при сварке переменным током с импульсами прямоугольной формы получают дугу, которая может гореть как с сосредоточенным катодным пятном, так и с рассредоточенным, что позволяет управлять проплавляющей способностью дуги при сварке и наплавке.

В качестве защитной среды используют чистый аргон или смеси аргона и гелия разных составов (табл. 4).

Истечение газовой струи должно иметь ламинарный характер; при турбулентном потоке возможен подсос воздуха в плаvilьное пространство. Скорость истечения при заданном расходе газа зависит от диаметра сопла d_c , а последний в свою очередь определяется диаметром электрода d_{w3} :

d_{w3} , мм	2—3	4	5	6
d_c , мм	10—12	12—16	14—18	16—22

Надежные условия защиты обеспечиваются за счет конструкции свариваемых деталей, увеличенного расхода газа или применения специальных отражающих экранов.

Для обеспечения равномерного течения газа по всему периметру сопла мунштук притапливают в горелке, а внутреннюю полость сопла выполняют параболической или конической с цилиндрической частью на входе. Наилучший характер истечения газовой струи обеспечивают сопла с выходным отверстием цилиндрической формы: при длине сопла, равной диаметру выходного отверстия, при наличии газовых линз — пористых перегородок, размещенных на выходе струи, а также в случае отсутствия закруглений внутренних кромок сопла. Завихрение газовой струи может возникать, если брызги металла осели внутри сопла; если неверно расположен присадочный пруток (угол между ним и поверхностью металла должен быть не больше $20-30^\circ$).

При сварке конец присадочной проволоки не должен выходить из зоны газовой защиты, а расстояние от нижнего края сопла до поверхности металла должно быть в пределах 5—10 мм, вылет вольфрамового электрода 1—5 мм.

Характер истечения защитной газовой струи зависит от формы сварного соединения. Хорошие условия защиты обеспечиваются при сварке тавровых соединений «в лодочку» (рис. 1.1, *а*), удовлетворительные — при сварке стыковых соединений (рис. 1.1, *б*) и плохие — при сварке соединений типов *в—д* (рис. 1.1).

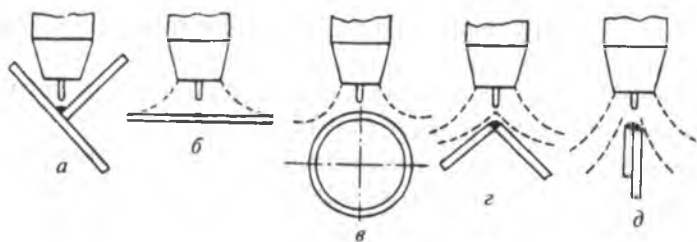


Рис. 1.1. Влияние формы сварного соединения на эффективность газовой защиты

Защиту можно улучшить за счет увеличения расхода газа или использования специальных отражающих экранов (рис. 1.2).

При сварке стыков труб используют кольцевые или секторные камеры, куда дополнительно подается защитный газ, а при сварке ответственных трубопроводов подается защитный газ во внутреннее пространство для защиты корня шва и исключения подсоса воздуха.

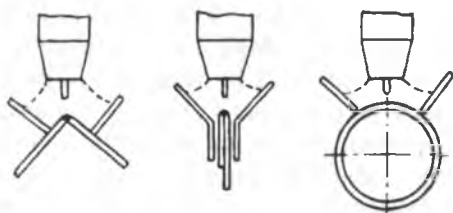


Рис. 1.2. Отражающие экраны для улучшения газовой защиты

Сварку тонкостенных прессуемых профилей можно вести без присадки, внахлестку вольфрамовым электродом углом вперед так, чтобы его торец находился на кромке технологического утолщения, которое будет полностью расплавляться. Зазор не должен быть больше 0,1 мм. Угловые швы тавровых соединений и соединений внахлестку, выполненные вольфрамовым электродом с присадкой, часто имеют непровары и включения оксидных пленок. Их появление на торцевой поверхности кромки верхней детали при соединении внахлестку связано с окислением мест контакта, которые находятся в твердотекучем состоянии конца сварочной проволоки, или мест натекания расплавленной сварочной ванны при сварке без присадки. Наличие выпуклого шва и нерасплавленной торцевой поверхности кромок верхней детали в головной части сварочной ванны, плохо защищенной инертным газом и закрытой сверху расплавленным металлом, препятствует его обработке дугой, поэтому при сварке без присадки число плен и непроваров значительно меньше. При этом угол наклона горелки увеличивается до 30–40° и формируется ослабленный шов вогнутой формы. При скосе кромки верхней детали уменьшается площадь контакта поверхностей проволоки и торца и натекания жидкого металла на проволоку. Полезно использовать наложение кратковременных импульсов тока, увеличивая частоту следования импульсов разнополярного тока с превышением длительности периода тока на обратной полярности, когда ширина зоны катодной очистки растет.

Повторная сварка на малых токах и последующие косметические проходы позволяют улучшить механические свойства при незначительном разупрочнении околошовной зоны.

Чтобы уменьшить образование оксидной пленки, используют специальные очищающие флюсы или флюсопасты:

МАТИ-6 (32 % LiF, 27 % AlF_3 , 17 % CaF_2 , 14 % K_2ZrF_6 , 10 % KBF_4), ФА1-Т (24 % LiF, 24 % CaF_2 , 24 % MgF_2 , 4 % титанового порошка), ТФА-5 (29 % LiF, 14 % CaF_2 , 21 % MgF_2 , 23 % BF_3), которые наносят в корень шва и на боковые поверхности вместо шабрения. Введение фторбората калия и фторцирконата калия, модифицирующих и рафинирующих компонентов обеспечивает полное исключение пленок оксидов, уменьшает пористость и содержание газов в металле шва.

Флюсы могут сохраняться в герметичной таре в течение одного года. Перед применением их разводят 4–5%-ным спиртовым раствором в соотношении 1:1 (срок хранения суспензии не больше 25 суток). В таком виде их наносят кистью на обратную сторону стыка; разрыв времени между нанесением и сваркой не должен превышать 8 ч. После сварки не позже 8 ч остатки флюса удаляют промыванием в подогретой до 40–50 °C воде. Сварку выполняют за два или несколько проходов: первый – без присадки или с малым ее количеством, что обеспечивает вогнутую (ослабленную) форму шва, и с использованием очищающих флюсов; второй и последующие проходы – с присадкой для обеспечения нужной геометрии шва на параметрах режима, приведенных в табл. 5.

Сварка вручную выполняется при расположении электрода «углом вперед» с общим направлением движения горелки справа налево; при этом уменьшается перегрев свариваемого металла. Вольфрамовый электрод отклоняют на 10–30° от нормали к свариваемому металлу, а угол между электродом и присадочной проволокой должен быть близким к 90°. Подачу защитного газа включают за 3–5 с до возбуждения дуги (для продувки системы от воздуха) и выключают через 5–7 с после обрыва дуги, чтобы защитить вольфрамовый электрод, остывающую сварочную ванну и шов.

Процесс сварки начинают на технологической планке. Зажигание дуги осуществляют с помощью осциллятора или на графитовой пластине. Сварочную ванну образуют при неподвижном положении горелки на основном металле и только после этого начинают равномерно, без поперечных колебаний передвигать горелку вдоль соединения. С начала передвижения горелки равномерно или короткими толчками подают присадочную проволоку в сварочную ванну так, чтобы конец

проволоки не касался вольфрамового электрода и не выходил из зоны газовой защиты.

Движения конца проволоки могут быть разными в зависимости от формы разделки и толщины свариваемого металла: серповидными для больших толщин металла с V-образной разделкой кромок; равномерными или возвратно-поступательными для средних и малых толщин, так чтобы проволока расплавлялась капля по капле, переходя в сварочную ванну. Присадочную проволоку нельзя вводить непосредственно в столб дуги под вольфрамовый электрод: это может привести к закоорачиванию дуги, мгновенному расплавлению и разбрызгиванию присадочной проволоки и нарушению процесса сварки. Конец проволоки нужно вводить в сварочную ванну на расстоянии 2—4 мм от столба дуги так, чтобы он не выходил из зоны газовой защиты при любых движениях.

Погружая проволоку в сварочную ванну, нужно одновременно понемногу отводить от нее конец вольфрамового электрода. Обрыв дуги осуществляют путем ее плавного удлинения. Чтобы продолжить сварку, дугу зажигают на шве на расстоянии 10—20 мм от его конца; тогда образовавшийся кратер будет переплавлен. В конце шва его тоже нужно тщательно заварить при остановленной горелке, подавая прутки в сварочную ванну до образования повышенного усиления. Если необходимо остановить процесс в пределах незаконченного шва, недопустимо оставлять кратер, потому что в нем образуются дефекты — трещины, свищи и т.д. Если кратер все же образовался в результате случайного обрыва дуги, его вырубают, зачищают проволоочной щеткой и продолжают сварку, перекрывая участок с дефектами. Сварку заканчивают также на технологической планке. При выполнении замкнутого соединения нужно завершать шов на ранее выполненном участке с предыдущей подрубкой и зачисткой.

В *многопроходных швах* каждый последующий валик необходимо накладывать только после тщательной зачистки стальной щеткой поверхности предыдущих валиков. При сварке термически упрочненных сплавов типа АМгб1Н и подобных наложение каждого последующего валика выполняется только после охлаждения изделия до 50 °С. Особенно тщательно нужно обеспечивать провар кромок деталей и ранее выполненных

валиков шва, не допуская натеков жидкого металла на поверхность швов, на кромки и прилегающую поверхность деталей, а также плавный переход от усиления к основному металлу.

Тавровые соединения желательно сваривать «в лодочку».

Стыковые соединения рекомендуется сваривать с двух сторон. После кантования изделия перед наложением шва с противоположной стороны необходимо удалить корень шва первым валиком и прихватки до чистого металла рубкой, фрезерованием или строжкой. При двухсторонней сварке термически неупрочняемых сплавов допускается выполнять первый проход шва сплавлением кромок без присадочного металла, что обеспечивает более глубокий провар корня шва.

Для металла толщиной до 10 мм можно использовать сварку на временной (съёмной) подкладке из нержавеющей стали толщиной 3–8 мм, шириной 30–50 мм с канавкой трапециевидного сечения глубиной 0,8–1,0 мм. Такой способ не нуждается в кантовании изделия или потолочной подварке, исключает подрубку корня шва и подварку с обратной стороны.

Для листов толщиной до 5 мм рекомендуется односторонняя сварка «на весу» с глубоким проплавлением кромок. Усиление в результате проплавления с обратной стороны должно быть не менее половины толщины свариваемых листов и устраняется после сварки механическим путем с последующим шлифованием заподлицо с основным металлом. Это позволяет повысить производительность изготовления конструкций, потому что не требуются кантование и подваривание с обратной стороны (при сварке термически неупрочняемых сплавов); при этом уменьшается коробление тонколистовых конструкций, снижается объем правки.

Более простой и эффективный способ борьбы с несплавлением в корне шва состоит в скруглении острых кромок листов в корне шва перед сборкой и сваркой. При такой подготовке образуется большое усиление обратной стороны шва без следов несплавления в результате увеличения силы поверхностного натяжения пленки оксидов на расплавленном металле, которая как бы вытягивает оксиды из корня. При использовании защитной смеси $Ag + He$ разных составов при том же сварочном токе растёт мощность сварочной дуги за счёт повышенного напряжения. Это позволяет повысить скорость сварки, не

снижая качество сварного соединения. На большей скорости сварку осуществляют, выполняя вертикальные сварные швы на тонколистовых конструкциях до 3 мм способом «сверху вниз», при этом уменьшаются сварочные деформации. При сварке в вертикальном и потолочном положениях используют присадочную проволоку меньшего диаметра, чем при нижнем положении. При толщине металла до 3 мм сварку ведут сверху вниз, при больших толщинах снизу вверх.

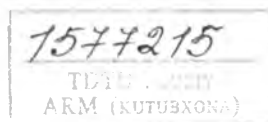
При *сварке стыковых соединений* с отбортовкой кромок ось вольфрамового электрода располагается под углом 30–45° к плоскости изделия с наклоном в сторону, противоположную направлению сварки, дуга должна быть минимально короткой, а торец электрода располагают ниже верхней грани отбортовки. Необходимая длина дуги определяется практическим путем в зависимости от типа сварного соединения, диаметра электрода, силы тока и скорости сварки. Показателем является напряжение на дуге, которое при сварке в аргоне составляет 11–15 В, а в гелии — 16–22 В. Скорость ручной сварки зависит от квалификации сварщика и лежит в пределах 6–15 м/ч, но и не регламентируется.

При *сварке криволинейных контуров* ось вольфрамового электрода располагается под углом 70–80° по касательной к поверхности изделия и на некотором расстоянии от точки зенита в сторону, противоположную направлению движения детали.

При *сварке тавровых и угловых соединений* элементов одинаковой толщины продольная ось вольфрамового электрода совпадает с биссектрисой угла между стенкой и полкой. При сварке элементов разной толщины ось электрода отклоняется от биссектрисы угла в сторону детали большей толщины для равномерного проплавления обеих деталей. Вольфрамовый электрод и присадочная проволока должны всегда находиться в одной плоскости.

С помощью этого способа сварки можно выполнять точечные соединения тонкостенных конструкций, причем сила сварочного тока зависит от суммарной толщины металла:

δ , мм	3	4	5	6
$I_{св}$, А	180	215	255	280



Диаметр вольфрамового электрода выбирается по табл. 1.7, расход аргона 5–6 л/мин. Сварка с присадкой ведется переменным асимметричным током при его частоте при сварке 6–8 Гц (коэффициент асимметрии длительности импульса 0,9–0,93), длине дуги 1–1,5 мм и скорости нарастания тока 220–350 А/с. Момент подачи проволоки совпадает с началом заварки кратера: длина дуги увеличивается до 3–5 мм, частота повышается до 20–40 Гц (коэффициент асимметрии длительности импульса уменьшается до 0,5–0,7), а скорость спада тока составляет 30–60 А/с. В результате такого действия сварочного тока растет циркуляция металла в ванне, пленки оксидов всплывают на поверхность, где разрушаются.

Зазор между деталями не должен превышать 0,1 мм, а нахлестки не больше 8 толщин верхнего листа.

1.4. Механизированная сварка неплавящимся электродом

При механизированной сварке справедливы те же основные положения, что и при ручной сварке. При роботизированном процессе дополнительно выдвигаются более жесткие требования к очистке присадочной проволоки, точности сборки деталей, плотности прилегания формирующих устройств. Сварку выполняют на тщательно отрегулированных автоматах, которые могут перемещаться по неподвижному изделию или изделие может перемещаться относительно неподвижного аппарата (сварка обечаек, стыков труб).

Сборку конструкций и трубопроводов из алюминия нужно осуществлять без прихваток в жестких кондукторах, центраторах и других специальных устройствах. В тех случаях, когда без прихваток невозможно обойтись, их выполняют длиной 10–20 мм с шагом 50–200 мм в зависимости от толщины металла; трубы прихватывают в 3–6 местах. Высота прихваток должна быть минимальной, что позволяет их переплавлять при сварке; если они слишком высоки, лишний металл срубуют. При наличии в прихватке трещин ее полностью вырубают и заваривают опять.

Механизированная сварка ведется на переменном токе, другие параметры режима приведены в табл. 1.8—1.10 и 6.

Таблица 1.8. Ориентировочные параметры режима однопроходной автоматической аргонодуговой сварки алюминия неплавящимся электродом

Тип соединения	Толщина металла, мм	$d_{Wэ}$, мм	$d_{прис}$, мм	$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	Q_{Ar} , л/мин
Стыковое без присадки	1	2	—	40—70	25—50	5—6
	2	3	—	80—100	20—40	7—8
	3	4	—	150—200	15—30	8—9
Стыковое без разделки кромок	1	2	1	60—100	40—80	5—6
	2	3	1,5	120—140	30—60	7—8
	3	4	1,5	160—210	20—40	8—9
Стыковое с V-образной разделкой кромок	6	4	2,5	240—260	20—30	12—15

Таблица 1.9. Ориентировочные параметры режима автоматической сварки стыковых соединений сплава АМгб неплавящимся электродом

Толщина металла, мм	$d_{Wэ}$, мм	$I_{св}$, А	$V_{\text{подачи проволоки, м/ч}}$	$V_{св}$, м/ч	Q_{Ar} , л/мин
4	5	220—260	102—108	12—14	14—16
6	5	280—300	93—97	12—14	14—16
8	6	320—360	83—88	10—12	14—16
10	8	420—480	64—72	8—10	16—20
12	10	460—520	52—56	6—8	25—30
14	10	550—6000	48—55	6—8	25—30
14	10	620—660	38—42	6—8	25—30

Таблица 1.10. Ориентировочные параметры режима автоматической сварки алюминия и его сплавов неплавящимся электродом (напряжение дуги 10—15 В)

Способ выполнения шва	Толщина металла, мм	$d_{Wэ}$, мм	$d_{прис}$, мм	$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	Q_{Ar} , л/мин	Число проходов
Двухсторонний без разделки	2—4	3—5	2	120—220	15—20	8—18	2

Окончание табл. 1.10

Способ выполнения шва	Толщина металла, мм	d_{w_3} , мм	$d_{прис}$, мм	$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	Q_{Ag} , л/мин	Число проходов
Двухсторонний с разделкой	4–6	4–6	2–3	150–300	12–18	10–18	2
	8–10	7–8	2–3	370–400	10–16	16–20	2
Односторонний с подкладкой	2–4	3–4	2	150–280	15–20	6–15	1
	6	6	2–3	280–320	15–20	10–15	1
Двухсторонний с подкладкой	8–10	7–8	2–3	370–420	10–15	15–20	2

Неплавящийся электрод располагается вертикально, а присадочная проволока диаметром не более 2,5 мм подается так, чтобы ее конец опирался на край сварочной ванны.

Производительность сварки неплавящимся электродом можно увеличить в 3–5 раз, используя трехфазную дугу. Дуги горят в одном факеле между двумя изолированными один от другого вольфрамовыми электродами, а также между каждым из них и изделием, в результате чего растет тепловая мощность дуги и улучшается ее стабильность. Такой дугой можно сваривать металл толщиной до 30 мм за один проход без разделки кромок на стальной подкладке (табл. 1.11).

Таблица 1.11. Ориентировочные параметры режима механизированной сварки алюминия трехфазной дугой

Толщина металла, мм	d_3 , мм		$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч
	вольфрамового	присадочной проволоки		
14	10	2	500–540	13–15
20	10	2,5	520–550	7–8
30	10	2,5	620–650	4–6

При расстоянии между электродами (0,5–0,75) d_3 можно регулировать форму шва: при последовательном расположении электродов вдоль сварного шва увеличивается глубина провара и уменьшается ширина шва и, наоборот, при поперечном расположении уменьшается глубина провара и увеличивается ши-

рина шва. Питание дуги осуществляется от двух стандартных однофазных трансформаторов, соединенных открытым треугольником, или от специального трансформатора для трехфазной сварки. Разновидностью этого способа является наплавка трехфазной дугой с помощью двухэлектродной горелки РГТ-6, которая питается от специального источника УДГТ-315.

В горелке закреплены два вольфрамовых электрода, а между ними подается плавящийся электрод со скоростью и на токе, которые можно изменять в широком диапазоне. Выводя конец плавящейся проволоки в процессе сварки из сварочной ванны, можно тем самым регулировать тепловложение и исключить прожоги тонкостенных изделий толщиной до 1 мм. В сущности речь идет о наплавке косвенной дугой, эффективность которой повышается в 2 раза на параметрах режима, приведенных в табл. 1.12.

Таблица 1.12. Ориентировочные параметры режима заварки дефектов в тонкостенных конструкциях из алюминиевых сплавов трехфазной дугой (диаметр присадки во всех случаях 3 мм)

Толщина металла, мм	Зазор, мм	$d_{Wэ}$, мм	Сварочный ток, А			U_d , В	Q_{Ag} , л/мин
			I_1	I_2	$I_{пр}$		
0,3	0—0,10	1,2	19	20	30	10—12	6—8
0,4	0—0,15	1,5	25	30	45	12—14	8—10
0,6	0—0,20	1,5	30	35	50	12—13	9—10
0,8	0—0,20	1,5	30	35	52	12—13	9—10

1.5. Плазменно-дуговая сварка

Плазменно-дуговая сварка выполняется сжатой дугой переменного и постоянного тока обратной полярности. Особенно перспективно использование переменного асимметричного тока прямоугольной формы: вследствие сокращения длительности действия тока на обратной полярности уменьшается тепловыделение на вольфрамовом электроде, благодаря чему можно уменьшить габариты и массу плазмо-

трона и повысить его работоспособность. В качестве плазмообразующего газа используется аргон, а защитными газами служат аргон, гелий и их смеси.

Формирование обратной стороны шва осуществляется как на подкладке, так и «на весу» при сквозном проникновении дуги.

Вследствие более высокой, чем при обычной аргонодуговой сварке, концентрации энергии уменьшается необходимая погонная энергия, вдвое увеличивается глубина провара, что важно для интенсивного перемешивания расплава по всему объему сварочной ванны, ускоряется дегазация, на порядок сокращаются число и протяженность грубых включений и оксидных плен в швах. При этом на 50–70 % возрастает производительность, в 4–6 раз снижается расход аргона, на 40 % — присадочной проволоки.

Стыковые соединения толщиной до 8 мм свариваются без разделки кромок с зазором 1,5 мм за один проход на стальной подкладке или с двух сторон «на весу» согласно параметрам режима, приведенным в табл. 1.13, 1.14.

Таблица 1.13. Ориентировочные параметры режима плазменной сварки стыковых соединений сплава АМг6 переменным током

Толщина металла, мм	$I_{св}$, А	U_d , В	$V_{св}$, м/ч	Q_{Ar} , л/мин
3–4	120–150	16	30–50	2–3
5–6	220–300	18	30	4–5
7–8	350–380	20	25	5–6

Положительные результаты можно получить при плазменной сварке сплавов серии 1400 как на «весу», так и на подкладке на параметрах режима: $I_{св} = 180–200$ А, $V_{пз} = 123–142$ м/ч, $V_{св} = 36$ м/ч, $Q_{Ar} = 0,1–0,2$ л/мин. Структура металла шва однородная, число хрупких прослоек в 2–3 раза меньше, чем при обычной аргонодуговой сварке.

Сборка полотнищ под механизированную сварку выполняется на специальном стенде без прихваток с нулевым зазором. Смещение кромок свариваемых деталей по высоте должно быть 0,5 мм для листов толщиной до 5 мм, 1 мм для листов тол-

щиной 6–8 мм. Листы собираются так, чтобы стык находился строго посередине формирующей канавки подкладки. Дуга зажигается на технологической планке. После прогрева и образования сварочной ванны включаются подача присадочной проволоки, потом движение каретки автомата. Сварку листов толщиной 8 мм лучше выполнять за два прохода, причем первый проход без подачи электродной проволоки. Плазмотрон может быть установлен на стандартном оборудовании, например на тракторе ТС-17, АДСВ-2 и т.п.

Таблица 1.14. Ориентировочные параметры режима механизированной плазменной сварки стыковых соединений алюминиевых сплавов

Толщина металла, мм	Диаметр, мм			$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	$Q_{газ}$, л/мин	
	вольфрамового электрода	внутреннего сопла	внешнего сопла			плазмообразующего	защитного
2	3,5	3	33	60–70	20–22	1,5	10–12
3	3,5	3	33	100–110	15–18	1,5	10–12
4	3,5	3	33	120–130	15–18	1,5	10–12
5	3,5	3	33	190–200	15–18	1,5	10–12
6	4,0	4	33	230–240	15–18	1,5	10–12
8	6,0	6	33	290–300	15–18	1,5	12–14

Для сварки металла толщиной 0,2–1,5 мм эффективно использование микроплазменного процесса на переменном токе 10–100 А; плазмообразующий и защитный газ — аргон с расходом соответственно 0,25–0,3 и 2,5 л/мин. При этом скорость сварки может достигать 60 м/ч. Хотя для этого процесса требуется прецизионная технологическая оснастка, тонкостенная сварная конструкция будет сварена с меньшими на 25–30 % деформациями, чем при обычной аргонодуговой сварке вольфрамовым электродом. Такие же толщины можно сваривать с использованием сжатой трехфазной дуги на режимах, параметры которых приведены в табл. 1.15. Прочность сварного соединения в сравнении со сваркой обычной открытой трехфазной дугой выше на 15–20 %.

Таблица 1.15. Ориентировочные параметры режима автоматической сварки алюминиевых сплавов сжатой малоамперной трехфазной дугой

Марка сплава	Толщина металла, мм	$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	Расход газа, л/мин	
				плазмообразующего	защитного
АМц	0,5	16–18	23–30	0,15–0,20	2–2,5
	1,0	22–24	20–25	—	—
АМгб	1,0	22–24	20–25	0,2–0,3	2,5–3,0
	1,5	26–28	15–20	0,2–0,3	2,5–3,0

1.6. Механизированная сварка плавящимся электродом

Такая сварка применяется при изготовлении металлоконструкций толщиной более 4 мм. При этом металл сварочной ванны перемешивается гораздо лучше, чем в рассмотренных выше способах, что приводит к уменьшению содержания оксидных плен, меньшей пористости, уменьшению сварочных деформаций и большей производительности по сравнению с показателями, достигаемыми прочими способами. Недостатком является некоторое снижение (до 15 % для сплава АМгб) механических свойств вследствие перегрева электродного металла.

Все способы и режимы сварки технического алюминия пригодны и для термически неупрочняемых сплавов АМц и АМг. При сварке высокопрочных и особенно термически упрочняемых алюминиевых сплавов необходимо применять меры по повышению стойкости шва и околошовной зоны против образования трещин, например, такие, как введение модификаторов — титана, циркония, бора, использование проволок с пониженным содержанием кремния или отличающихся по составу от основного металла, термическая обработка изделия после сварки (закалка с последующим старением), повышение стойкости соединения к усталости, достигаемое снятием усиления сварного шва, и т.п. Сварка ведется на постоянном токе обратной полярности от источников питания с жесткой внеш-

ней характеристикой с помощью автоматов или полуавтоматов с тянущей или тяни-толкающей системой подачи алюминиевой проволоки. Связь между диаметром электродной проволоки, сварочным током, напряжением на дуге и скоростью подачи проволоки приведена в табл. 1.16.

Таблица 1.16. Ориентировочные параметры режима аргонодуговой сварки алюминия плавящимся электродом

Параметры	Диаметр электродной проволоки, мм						
	1,2	1,6	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
$I_{св}$, А	100–250	150–300	200–350	250–400	280–450	400–500	450–600
U_d , В	18–26	19–25	20–25	21–24	22–26	26–30	33–35
$V_{пз}$, м/ч	240–840	240–660	240–420	240–360	120–240	120–180	30–60

Защита дуги осуществляется инертными газами — аргоном, гелием и их смесями, в которых содержание гелия может достигать 70 %. Такая смесь очень эффективна при сварке металла толщиной более 15 мм, при этом повышается плотность металла шва. Сегодня вообще заметна тенденция заменять аргон на гелий или аргоногелиевую смесь с содержанием гелия до 70 % при сварке алюминиевых сплавов плавящимся электродом. Установлено, что при этом на 200–220 °С снижается перегрев каплей электродного металла и на 35–45 °С повышается температура сварочной ванны, что позволяет увеличить скорость сварки на 40–60 %, уменьшить ширину шва, сократить расход электродной проволоки на 30–40 % и снизить объем пустот в металле шва в 2–8 раз.

Так, для сварки сплава АД0 содержание гелия в смеси должно быть не менее 70 %, а для сплавов АМг6 и АМг61 — не менее 60 % независимо от свариваемых толщин, но с увеличением толщин будет расти общий расход смеси.

При сварке в аргоноокислородной смеси $Ar + (2–8\%)O_2$ струйный перенос электродного металла получается без разбрызгивания и одновременно подавляется пористость. Расстояние от края сопла до изделия составляет 8–15 мм. Чтобы уменьшить загрязнение внутренней поверхности сопла и не допустить ухудшения газовой защиты, используют медные во-

доохлаждаемые сопла, которые периодически зачищают от брызг. Оптимальные значения скорости сварки лежат в пределах 10–25 м/ч. Увеличение этого параметра более 30 м/ч приводит к пористости, ухудшает защиту и формирование металла шва. Параметры режима автоматической аргонодуговой сварки стыковых соединений алюминия «на весу» приведены в табл. 1.17, другие варианты – в табл. 7.

Таблица 1.17. Ориентировочные параметры режима автоматической сварки стыковых соединений «на весу» плавящимся электродом

Тип подготовки кромок	Толщина металла, мм	d_3 , мм	$I_{св}$, А	U_d , В	$V_{св}$, м/ч	Q_{Ar} , л/мин	Число проходов
Без разделки	4	1,2–1,6	140–150	19–21	30	10–12	1
	6	1,2–1,6	170–200	20–22	30	12–14	2
	8	1,6	220–250	22–24	20–25	1520	2
	10	2,0–2,5	300–320	22–24	20–25	20–25	2
V-образная разделка	12	2,0–2,5	330–350	22–24	20–25	20–25	2
	15	2,0–2,5	350–380	24–26	20–25	28–35	2
	20	4,0	500–540	28–30	11–18	30–35	2

Стыковые листовые соединения толщиной 2 мм из алюминиевого сплава 1441 рекомендуется сваривать проволокой марки СвАМг63 диаметром 1,6 мм аргонодуговой сваркой плавящимся электродом на параметрах режима $I_{св} = 55$ А, $V_{пз} = 105$ м/ч, $U_d = 17$ В, $V_{св} = 30$ м/ч или неплавящимся электродом на параметрах режима $I_{св} = 150$ А, $d_{wэ} = 3$ мм, $V_{пз} = 75$ м/ч, $V_{св} = 14$ м/ч. Прочность сварного шва составляет 70 % прочности основного металла. Применение способа сварки этого сплава трением с перемешиванием на параметрах режима $n = 2880$ об/мин, $d_{бурта\ инструмента} = 12$ мм, $V_{св} = 14$ м/ч обеспечивает меньшее разупрочнение, чем дуговые способы сварки, вследствие меньшей степени перегрева.

Импульсно-дуговой процесс позволяет достичь значительной производительности сварки алюминия плавящимся электродом: существенно уменьшается нижний предел сварочного тока и размер капель, стабилизируется тепловложение на токах до 70 А при сварке полуфабрикатов толщиной 1–2 мм

($d_3 = 0,8-1,0$ мм, сварка импульсами частотой 25–40 Гц и длительностью 1,4–2,5 мс). Благодаря этому расширяются диапазоны рабочих токов с управляемым мелкокапельным переносом металла, улучшаются стабильность горения дуги и формирование швов, что позволяет использовать этот вид сварки во всех пространственных положениях, уменьшаются пористость и деформации тонколистовых конструкций (толщиной 2–4 мм). Импульсный подогрев околошовной зоны способствует измельчению ее структуры, а повышение частоты модуляции и длительности пауз сварочного тока значительно улучшает структуру шва.

Режим полуавтоматической сварки, параметры которого приведены в табл. 8, предназначен для нижнего положения, для других положений сварочный ток нужно уменьшить на 10–15 %.

Особенно эффективна импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом при соединении металла толщиной до 3 мм, которое обычно выполняется с помощью подкладных формирующих устройств. При использовании источников питания TPS (Trans Puls Synergic) появляется возможность модуляции основных параметров процесса, что позволяет управлять тепловложением, скоростью кристаллизации сварочной ванны и получать надежное формирование корня шва при сварке «на весу» без подкладных формирующих устройств. Для обеспечения качественного шва диаметр электродной проволоки при сварке металла толщиной 2,5–3 мм должен быть 1,2 мм, а для толщин менее 2 мм — не более 1 мм.

При сварке с использованием обычных источников питания дуги (без импульсов) сила тока может быть увеличена на 15 %. При автоматической импульсно-дуговой сварке изделий толщиной менее 10 мм и использовании проволоки диаметром 1,4–2,5 мм целесообразно устанавливать режимы, рекомендованные для полуавтоматической сварки. Особенно эффективна импульсно-дуговая сварка с использованием гелиево-аргоновых смесей при соединении алюминия высокой чистоты и сплавов алюминия с литием, имеющих высокую склонность к образованию пор (табл. 9).

Для металла толщиной 4 мм ток в импульсе при его длительности 2,8–3 мс составляет 510–535 А при базовом токе

105–115 А, а для металла толщиной 6 мм — соответственно 3–3,3 мс, 475–505 А и 190–210 А. Импульсно-дуговая сварка модулированным током также позволяет получить качественное сварное соединение (табл. 10).

При импульсно-дуговой сварке низкочастотным модулированным током достигается повышение качества шва, так как обеспечивается формирование пачки импульсов, в результате чего расплавленный металл вытесняется в хвостовую часть ванны, увеличивая провар. В период пауз происходят охлаждение сварочной ванны и ее кристаллизация, что исключает прожоги, подтекание металла под нижнюю часть свариваемых кромок.

Амплитуда и длительность импульсов тока в течение пауз и пачки импульсов обеспечивают управляемый перенос металла во время как пауз, так и импульсов, что гарантирует стабильность процесса (табл. 11).

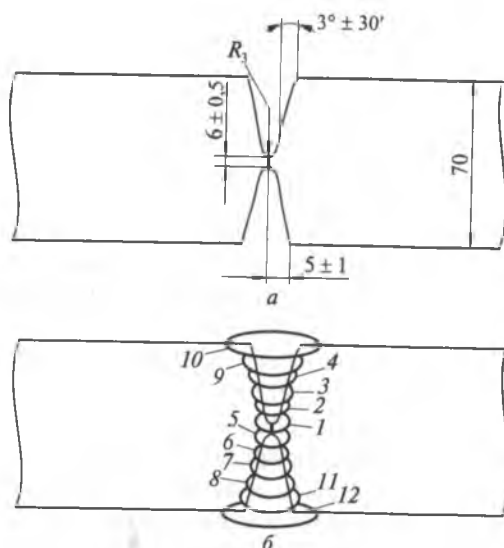


Рис. 1.3. Подготовка кромок к сварке (а) и порядок наложения слоев (б)

При проведении импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом в защитной среде гелия обеспечиваются высокая концентрация тепловой энергии и высокая скорость процесса, число дефектов снижается на 30–40 %, а производительность возрастает в 4–5 раз. Сварка этим способом требует узкой раз-

делки кромок (рис. 1.3, а). Для снижения уровня угловой деформации после первых четырех проходов (параметры режима сварки отдельных проходов приведены в табл. 1.18) изделие кантуется на 180° , специальной фрезой выбирается корень шва с проплавом и выполняются пять проходов с обратной стороны, потом осуществляется новое кантование и разделка окончательно заполняется с двух сторон — всего за 12 проходов (рис. 1.3, б).

Таблица 1.18. Ориентировочные параметры автоматической импульсно-дуговой сварки сплава АМг6 плавящимся электродом в среде гелия (во всех случаях $d_3 = 2,5$ мм, $V_{св} = 42$ м/ч, $Q_{He} = 80-90$ л/мин)

№ прохода	$I_{св}$ (сред), А	U_d , В	$V_{пз}$, м/ч	Характеристика импульсов	
				Частота, Гц	Продолжительность, мс
1	170	24	200	80	2,1
2	230	28	250	155	1,7
3–12	270	30	260	200	1,7

Чтобы повысить производительность импульсно-дуговой сварки, используют специальное оборудование, позволяющее вести процесс одновременно двумя дугами. Сварочные проволоки диаметром 1,2 мм подаются в специальную горелку, конструкция которой позволяет изменять расстояние между проволоками, подавать для каждой дуги свой защитный газ и сваривать импульсной или стационарной дугой на токах 20–250 А. Сопло имеет овальную форму, расстояние между ним и поверхностью изделия 8–12 мм, между проволоками на выходе — 13 мм, а в зоне плавления 5–12 мм.

При этом появляется возможность управления составом сварочной ванны путем использования стандартных сварочных проволок разных систем легирования. Способ позволяет устранять прожоги при сварке тонколистовых конструкций — стыковых и замковых соединений, тавровых и нахлесточных соединений. Для повышения производительности при многопроходной сварке и наплавке в V-образную разделку можно разворачивать горелку вокруг оси на $45-90^\circ$.

В последнее время разработан способ СМТ (Cold Metal Transfer — перенос холодного металла), заключающийся в импульсной подаче проволоки вперед-назад с высокой частотой. Проволока подается вперед и при возникновении короткого замыкания сразу автоматически отводится назад. В период фазы зажигания дуги на короткий момент выделяется теплота, потом ее введение сокращается, поэтому в сварочную ванну переносится мало перегретый металл. В результате капля электродного металла переходит в сварочную ванну в момент короткого замыкания без брызг, так как ток короткого замыкания мал. Это позволяет вести процесс сварки во всех пространственных положениях, а также сваривать сверхтонкий металл до 0,3 мм без подкладки.

Полуавтоматическую сварку ведут «углом вперед» с наклоном оси горелки под углом 10–30° к нормали, направленной к поверхности изделия. Токоподводящий мундштук не должен выступать из газового сопла, а располагаться на расстоянии 3–5 мм от его среза. Если ведется сварка швов большой протяженности, их разбивают на короткие участки длиной 100–300 мм, причем для больших толщин эти участки длиннее, для меньших — более короткие, а сваривают их обратноступенчатым способом.

Сварочную дугу зажигают путем замыкания электродной проволоки на изделие с последующим включением механизма подачи проволоки и источника питания. Сварку шва начинают и заканчивают на технологических планках. Если их невозможно установить (на кольцевых или замкнутых соединениях), допустимо заканчивать шов на уже выполненном участке с предварительной его подрубкой и зачисткой.

Сварку ведут вдоль соединения с одинаковой скоростью без поперечных колебаний, что обеспечивает надежный провар корня шва при первом проходе, но такие колебания допустимы при последующем наложении валиков многопроходного шва.

При выполнении шва в нижнем положении горелку нужно равномерно легкими возвратно-поступательными движениями перемещать вперед по спирали. Когда горелка движется вперед, расплавляют и очищают корень шва, а при возвратном движении заполняют расплавленную часть шва.

При выполнении швов тавровых и угловых соединений ось электродной проволоки направляют по биссектрисе угла, образованного свариваемыми деталями. Сварку мелких узлов и изделий желательно выполнять с установкой их «в лодочку». В случае тавровых соединений деталей разных толщин сварочную дугу направляют на более толстую деталь. При сварке многопроходных швов тщательно зачищают проволоочной щеткой поверхность ранее наложенных валиков.

Сварку толстолистового металла из алюминиевого сплава 1201 толщиной 50–60 мм предлагается выполнять в два приема. Первым проходом неплавящимся электродом в среде гелия проваривается технологическое притупление кромок 5–8 мм на постоянном токе прямой полярности на режиме: $d_{wэ} = 3–4$ мм; $I_{св} = 300–350$ А; $V_{св} = 15$ м/ч. Последующими проходами заполняется разделка уже плавящимся электродом также в среде гелия на режиме: $d_э = 1,6$ мм; $I_{св} = 250–300$ А, $V_{св} = 30$ м/ч. Другая технология сварки сплава 1201 плавящимся электродом в среде гелия стыковых соединений алюминиевых плит в узкую разделку выполняется на режиме, который обеспечивает формирование шва за один проход высотой 5 мм с вогнутым мениском: $d_э = 1,2$ мм; $I_{св} = 200$ А; $U_d = 30$ В; $V_{св} = 28$ м/ч. Варианты ведения процесса и последовательность наложения валиков в зависимости от толщины металла представлены на рис. 1.4.

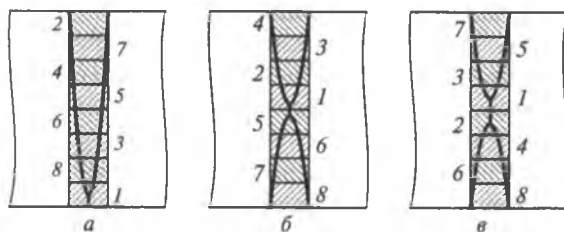


Рис. 1.4. Последовательность наложения валиков в стыковом толстолистовом соединении

По варианту на рис. 1.4, а сварка ведется от нижней поверхности плит к верхней, качественное сварное соединение достигается при толщине плит до 30 мм, при больших толщинах возникает растрескивание в корне сварного шва.

По варианту на рис. 1.4, б сварка ведется от середины толщины плит к верхней кромке, потом изделие кантуется и заполняется вторая половина. Сварка может выполняться в лю-

бом пространственном положении с одним переходом на сторону, но при этом появляется угловая деформация, избежать которой можно при несимметричной разделке кромок с учетом толщины изделия, усадки шва и угловой деформации, при заполнении разделки с первой стороны. Такая технология наиболее приемлема для толщин 30—150 мм.

По варианту на рис. 1.4, в сварка ведется начиная от середины толщины поочередно или одновременно с двух сторон. Если вести сварку в вертикальном положении, тогда суммарная угловая деформация почти отсутствует и нет необходимости кантовать изделие.

Для уменьшения внутренних напряжений применяется сварка блоками, а заполнение разделки выполняется слоями при малом времени между сваркой каждого слоя. Сварка блоками начинается с середины стыка и продолжается до заполнения разделки так, что каждый последующий слой блока наплавляется на еще горячий предыдущий слой. При этом не допускается перегрев основного металла, особенно при сварке термически упрочняемых закалкой сплавов: каждый последующий валик наплавляется только после охлаждения изделия до 50 °С.

При сварке вертикальных швов рекомендуются поперечные колебания электродной проволоки, а сам процесс нужно вести снизу вверх. Конец электродной проволоки нужно откусывать кусачками перед каждым зажиганием дуги. В процессе сварки нельзя допускать коротких замыканий электродной проволоки на поверхность ванны или изделия, потому что при этом происходит взрыв, металл выплескивается из ванны и в этих местах образуются поры. В таких случаях сварку прекращают, поверхность металла зачищают, а загрязненный участок шва вырубают. При перерыве в процессе сварки защитную струю аргона выключают через несколько секунд. По окончании сварки кратер нужно выводить на планку или на менее напряженный элемент шва. В последнем случае его заваривают, заполняя электродным металлом при неподвижном положении горелки. После произвольного обрыва дуги сварку начинают на расстоянии 25—40 мм до места обрыва, пытаясь свести к минимуму усиление шва; таким же образом нужно переплавлять и прихватки. При выполнении прерывистых швов тонкой

электродной проволокой в начале и конце шва дополнительно подают проволоку до образования небольшой бобышки. Прихватки перед сваркой не вырубают, а только зачищают от оксидной пленки.

Нужно иметь в виду, что при полуавтоматической сварке плавящимся электродом число дефектов увеличивается, внешне шов выглядит хуже, чем при ручной сварке вольфрамовым электродом, а выполнять его может только сварщик высшей квалификации.

1.7. Автоматическая сварка плавящимся электродом в защитных газах

Такая сварка используется только в нижнем положении и в основном для стыковых соединений больших толщин на специальных плоских стендах и плитах с прижимными устройствами.

Накопленный на ПО «Азовмаш» производственный опыт по сварке алюминиевых конструкций позволил составить номограмму для выбора параметров режима автоматической сварки крупногабаритных толстостенных изделий из алюминиевых сплавов (рис. 1.5). По марке сплава и толщине свариваемого металла можно без предварительных исследований определить 8 основных параметров режима двухсторонней сварки стыковых соединений без разделки кромок в нижнем положении. При этом расстояние от торца сопла до свариваемого металла не должно быть больше 9–10 мм ($I_{св} < 500$ А) и 6–8 мм ($I_{св} > 500$ А), а расстояние от токоподводящего мунштука до торца сопла должно быть в пределах 8–12 мм. Допускается увеличение на 5–10 л/мин содержания гелия в смеси и общего ее расхода на 5–10 л/мин при токе, большем 500 А, если сварка ведется на открытых участках при температуре воздуха ниже 10 °С.

Номограмма позволяет назначать параметры режима сварки плит с разделкой кромок на глубину до 20 % толщины металла с каждой стороны. При этом нужно увеличивать скорость сварки.

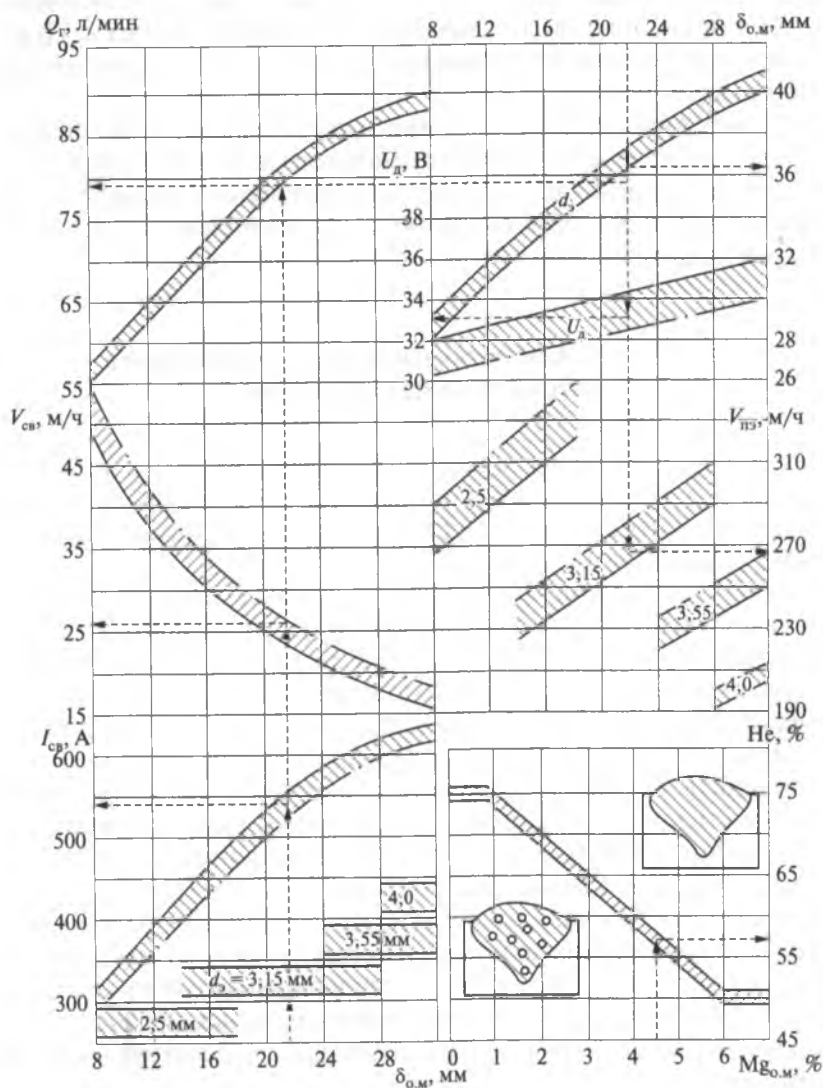


Рис. 1.5. Номограмма для выбора параметров режима автоматической дуговой сварки плавящимся электродом в гелиево-аргоновой смеси стыковых соединений алюминиевых сплавов толщиной 8–32 мм

В начале и конце соединения обязательно устанавливают и приваривают технологические планки, на которых начинают и заканчивают каждый валик шва. У планок такие же, как у свариваемых письмами, толщина и подготовка кромок. Сварку рекомендуется вести немного на подъем (с углом наклона $2-3^\circ$) для лучшего проплавления. При этом горелку автомата наклоняют «углом вперед» (ось горелки отклонена от вертикали на $5-20^\circ$).

При выполнении кольцевых швов сварка ведется «на спуск». В этом случае электрод смещают с зенита в сторону, обратную вращению детали, что увеличивает ширину шва, улучшает его формирование и качество сварки. Токоподводящий мундштук горелки располагают выше среза газового сопла на 10–15 мм, которое должно быть не далее 10–15 мм от поверхности изделия. После каждого прохода шва из газового сопла удаляют налеты брызг и оксидов. Автоматическая сварка выполняется с двух сторон, подварка обратной стороны шва осуществляется после кантования полотнища и обязательной вырубки корня шва до чистого металла. Автоматической односторонней сваркой плавящимся электродом на временной подкладке в виде полосы из нержавеющей стали с канавкой можно сваривать детали толщиной более 10 мм на специальном стенде с прижатием свариваемых элементов по всей длине.

Сварка обечаек котлов из алюминиевого сплава АДО выполняется на параметрах режима, приведенных в табл. 1.19.

Таблица 1.19. Ориентировочные параметры режима автоматической сварки плавящимся электродом марки СвА5 диаметром 3,15 мм алюминия марки АДО в гелиево-аргоновой смеси (сварка ведется с помощью трактора ТС-56)

Толщина металла, мм	$I_{св}$, А	U_d , В	$V_{пз}$, м/ч	$V_{св}$, м/ч	Расход газа, л/мин	
					Аг	Не
14–16	410–420	30–32	200–220	20–22	20–25	45–55
25	480–520	32–34	230–250	15–17	20–25	55–70
28	520–560	33–35	250–270	13–15	20–25	55–70

Качественное формирование внутренних кольцевых швов обеспечивается за счет использования гибкой эластичной подкладки в виде бесконечной ленты, которая прижимается к из-

делию с помощью специального устройства. Подкладка шириной 112 мм и толщиной 8 мм сплетена из тонкого медного провода и жестко скреплена по всей длине проволочными скобами диаметром 1,6 мм к резиноканевому ремню шириной 130 мм и толщиной 8 мм. Между лентой и ремнем размещена шестислойная стеклотканевая теплоизоляция, так что общая толщина прокладки составляет 20 мм. Подкладка перемещается синхронно с вращением обечайки и выдерживает действие сварочного тока до 600 А. В процессе сварки лента постоянно изменяет зону контакта и каждый раз в контакт вступает уже охлажденный участок, который улучшает теплоотвод.

Сварка неповоротных стыков алюминиевых труб начинается и заканчивается обычно в потолочном положении во избежание провалов в конце процесса.

При *сварке тавровых соединений* (приварка ребер жесткости к плоскому полотнищу) качественное формирование угловых швов обеспечивается оптимальным напряжением на дуге. Показателем этого служит монотонный звук, создаваемый дугой, с незначительным потрескиванием, которое свидетельствует об отдельных коротких замыканиях дугового промежутка. Автоматическое слежение по стыку углового шва осуществляется механическим устройством — копировальным роликом, жестко связанным со сварочной головкой автомата. Усилие прижима ролика к вертикальному элементу таврового соединения регулируется изменением расстояния между ведущими колесами тележки и поперечным перемещением заднего опорного ролика автомата. Для равномерного движения автомата с заданной скоростью усилие прижима должно быть минимальным. Токоподводящий мундштук не должен выступать из газового сопла, а расстояние между их нижними срезами должно быть 3—5 мм при диаметре электродной проволоки до 2 мм и 5—10 мм при диаметре 2—2,5 мм. Расстояние между нижним срезом сопла и поверхностью валика должно равняться 3—10 мм. Внутреннюю поверхность сопла горелки нужно периодически, после сварки швов длиной 25—30 м, по мере загрязнения очищать от брызг, сажи и металлического конденсата.

При *сварке тонколистовых алюминиевых конструкций*, как и при наплавке точечных рельефов, может быть использована импульсно-дуговая сварка с помощью специального оборудо-

вания. Горелка со специальной насадкой обеспечивает постоянное расстояние между соплом и верхним листом соединяемых деталей, а также прижатие верхнего листа к нижнему, так чтобы зазор между ними не превышал 0,8 мм. Вылет проволоки составляет 14–16 мм, для одностороннего шва расстояние между точками составляет 34–35 мм, а нахлестка 60 мм. Отверстия в верхнем листе выполняются в виде усеченного конуса для гарантированного проплавления и уменьшения выпуклости сварной точки. Параметры режима устанавливаются автоматически микропроцессором в зависимости от скорости подачи электрода и длины дуги (рис. 12).

Оптимальная прочность достигается при равенстве усилий на срез сварной точки и разрыва основного металла, что определяется размером ядра сварной точки и соответственно расстоянием между швами и толщиной листов. Наличие отверстий увеличивает ядро точки и на 15–20 % снижает тепловложение в основной металл. Замена аргона на гелий увеличивает на 20–40 % диаметр ядра и в 1,5–2 раза глубину проплавления, уменьшает число и размер пор на поверхности и в сечении шва, повышает прочность соединения. Для снижения деформации верхнего листа сварку ведут на максимальных токах при минимальной длительности их протекания либо с помощью кратковременных локальных нагревов и капельного дозирования присадочного металла и его температуры (рис. 1.6).

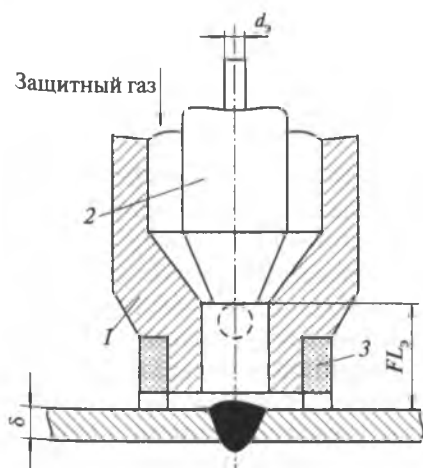


Рис. 1.6. Схема процесса дуговой точечной сварки:

1 — сопло; 2 — теплоотводящий мундштук; 3 — опорная втулка

Нагрев свариваемых элементов выполняется дугой на постоянном токе обратной полярности в аргоне. С целью локализации нагрева и снижения расхода газа диаметр выходного отверстия сопла 1 выбирается близким диаметру сварной точки, а отверстие сопла благодаря опорной втулке 3 подводится плотно к поверхности детали. Каждая капля массой 90–100 мг формируется на участке вылета электрода L_3 , расположенного около конца массивного теплоотводящего мундштука 2. При формировании капли и разогреве детали электрод и мундштук неподвижны. После формирования капли последующее горение дуги используется для нагрева детали; масса капли не изменяется, а ее диаметр зависит от диаметра проволоки и вылета. Диаметр проволоки выбирается в зависимости от толщины свариваемого металла и составляет 1,6 мм для толщин 0,8–1,2 мм и 2 мм для толщин 1,2–1,6 мм. Сварка ведется по специальной программе (рис. 1.7).

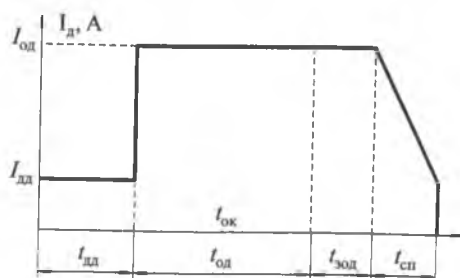


Рис. 1.7. Циклограмма сварочного тока при формировании и переносе капли:
 $I_{дд}$ — ток дежурной дуги; $I_{од}$ — ток основной дуги; $t_{дд}$ — время существования дежурной дуги; $t_{ок}$ — момент отрыва капли; $t_{од}$ — время существования основной дуги; $t_{зод}$ — время задержки основной дуги; $t_{сп}$ — время спада тока

В начале цикла происходит зажигание дуги на небольшом токе $I_{дд}$. При использовании импульсов однополярного тока с частотой 150 Гц ток увеличивается до $I_{од}$; при этом регулируются время горения дежурной дуги, время горения основной дуги, время задержки тока после отрыва капли и время спада тока до значения $I_{дд}$. Таким образом, процесс сварки автоматизирован, что позволяет привлекать сварщиков невысокой квалификации для выполнения сварки как «на весу», так и на съемной подкладке стыковых и нахлесточных соединений с отверстиями в верхних листах из сплавов марок АМц, АМг, АК и др.

1.8. Автоматическая сварка с использованием флюса

Такая сварка применяется для получения соединений толщиной от 10 до 60 мм по двум схемам.

Первая схема носит название сварки по слою флюса или полуоткрытой дугой. При этом в состав флюсов вводятся хлористые и фтористые соли щелочно-земельных металлов (табл. 13); они имеют высокую электрическую проводимость в жидком состоянии, в результате чего шлак может шунтировать дугу и превратить дуговой процесс в электрошлаковый.

При сварке по слою флюса определенной высоты и ширины, который насыпается впереди дуги с помощью специального дозатора, дуга только наполовину горит под флюсом. Ванна расплавленного металла защищена тонким слоем жидкого шлака, который способствует хорошему газоудалению, но сварщик вынужден использовать маску или щиток для защиты от излучения. Благодаря высокой концентрации энергии при сварке по флюсу обеспечивается глубокое проплавление основного металла, в результате чего нет нужды в разделке кромок при сварке металла толщиной 20–25 мм и больше. Эта технология используется при изготовлении цистерн, котлов, других емкостей из технического алюминия и сплава АМц толщиной 10–30 мм без предварительного подогрева. Сварку ведут одной проволокой (табл. 1.20) на стальных подкладках двухсторонними швами или двумя проволоками, подключенными к одному источнику питания, — расщепленной дугой. При этом дуга блуждает между проволоками, рассеивая тепловую мощность, благодаря чему уменьшаются требования к точности сборки и прижима к подкладкам. Сварку можно проводить на флюсовой подушке односторонним швом на постоянном токе обратной полярности согласно данным табл. 1.21. Вследствие более равномерного распределения энергии по сечению шва резко снижается вероятность прожогов металла. Для этого способа разработан специальный сварочный трактор ТС-33, который оборудован бункером с дозатором высоты и ширины флюса, подающим механизмом тянущего типа, специальным мундштуком и газоотсасывающим устройством.

Таблица 1.20. Ориентировочные параметры режима автоматической сварки по флюсу

Толщина металла, мм	d_3 , мм	$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	Слой флюса, мм	
				Высота	Ширина
10–12	1,6–1,8	220–280	18–19	9–10	27
14–18	2–2,8	300–450	15–17	11–12	30–42
20–25	3–3,5	450–550	13–14	14–16	40–46

Таблица 1.21. Ориентировочные параметры режима автоматической сварки алюминия по флюсу расщепленной дугой

Толщина металла, мм	d_3 , мм	Расстояние между осями проволок, мм	$I_{св}$, А	U_d , В	$V_{св}$, м/ч	Слой флюса, мм	
						Высота	Ширина
12	1,6	7–9	320–340	34–36	17–18	11	30
16	2	8–10	400–450	38–40	15–16	12	42
20	2,5	9–12	460–500	38–40	12–14	16	46

Вторая схема — сварка под флюсом (закрытой дугой) выполняется при большой плотности тока, благодаря чему достигается глубокое проплавление и не требуется разделки кромок. Разработанные для этого процесса керамические флюсы имеют небольшую электрическую проводимость благодаря наличию кварцевого песка и фтористого кальция (табл. 13), которые вводятся в флюс как стабилизаторы, препятствуя превращению дугового процесса в электрошлаковый. Сварка проводится расщепленной дугой на переменном или постоянном токе обратной полярности на режимах, указанных в табл. 1.22. При этом способе сварки улучшаются условия труда сварщиков и повышается производительность. Во всех случаях как присадку используют проволоки марок по табл. 1 в соответствии с составом свариваемых сплавов, так что качество сварных швов независимо от разновидности сварки полностью удовлетворительное.

Таблица 1.22. Ориентировочные параметры режима автоматической сварки под флюсом алюминия расщепленной дугой при скорости сварки 13 м/ч

Толщина металла, мм	d_3 , мм	$I_{св}$, А	U_d , В
14	3	550–620	28–34
34	2,5	1100–1200	32–36
40	3	1400–1500	34–38
50	3	1800–1900	36–38

1.9. Электрошлаковая сварка

Электрошлаковая сварка алюминиевых сплавов выполняется пластинчатыми электродами большого сечения и плавящимися мундштуками с подачей в зону сварки ленты или проволоки по каналам мундштука в сочетании со специальными флюсами, приведенными в табл. 13.

Так, при сварке алюминиевых шин площадью 650×70 мм начальный участок подогревается с помощью графитового электрода теплотой шлаковой ванны под флюсом АН-301 без подачи электродной проволоки; подогрев и сварка осуществляются от одного источника питания на режиме: $d_3 = 9$ мм; $I_{св} = 1,5–2,5$ кА; $U_{шв} = 32–46$ В; $V_{св} = 5,5$ м/ч. Шов формируется медными водоохлаждаемыми ползунами или графитовыми кристаллизаторами. Использование кристаллизаторов не влияет на качество сварного шва, а употребление графитовых электродов на начальной стадии процесса для подогрева свариваемых кромок полезно, пока не началось формирование шва. Тип и расположение возможных дефектов не влияют на рост электрического сопротивления шины, а уменьшение рабочего сечения проводника на 10 % увеличивает общее сопротивление только на 1 %, что допустимо по правилам его эксплуатации.

Параметры режима электрошлаковой сварки обеспечивают высокую производительность сварочных работ, иногда на два порядка выше, чем у аргонодуговой сварки.

1.10. Электронно-лучевая сварка

Электронно-лучевая сварка создает благоприятные условия для разрушения и удаления пленки оксида в результате механического действия на пленку паров металла, а также разложения оксидов алюминия в процессе контакта алюминия с пленкой при окончательном остаточном давлении не больше 0,13 Па и температуре 1450 °С. Глубокий вакуум в свою очередь способствует удалению водорода и азота из металла шва, а так как металл шва пребывает в твердожидком состоянии короткое время, временные внутренние напряжения не успевают вызвать образования кристаллизационных трещин. В результате минимального термического влияния при высоких скоростях сварки у высокопрочных алюминиевых сплавов можно предотвратить разупрочнение металла в околошовной зоне. Однако при переходе металла из жидкого состояния в твердое пары металла и растворенные газы способствуют возникновению дефектов в виде пор, раковин, корневых усадочных микротрещин. Поэтому необходимо стабилизировать условия гидродинамического перемещения жидкого металла сканированием луча, траектория которого может иметь вид окружности, эллипса, полуэллипса и т.п. с частотой 750—100 Гц и амплитудой развертки 1—3 мм.

Дискретная развертка с регулируемым временем задержки луча в точке его остановки в пределах выбранной траектории в виде кривых второго порядка или их комбинаций при постоянных значениях погонной энергии позволяет избежать структурной слоистой неоднородности, измельчать структуру шва и повышать его плотность. Избежать образования дефектов в корневом шве можно путем проплавления его с большим радиусом закругления в корневой части шва, что обеспечивается круговой разверткой луча и его фокусированием на участке замыкания шва, выбором оптимальной частоты развертки пучка и увеличением угла отклонения развертки. Для сплава АМг6 это достигается на таких параметрах режима (табл. 14): $I_n = 340$ мА; $U_{\text{уск}} = 28$ кВ; $V_{\text{св}} = 24$ м/ч; частота развертки 170 кГц; угол отклонения 0,07—0,08 рад.

Тавровые соединения из закаленного сплава АМгбНПП (листы 2000×500×8 мм сваривают с ребрами жесткости 40×5 мм при изготовлении ребристых панелей) выполняли на параметрах режима: $I_n = 55\text{--}65$ мА; $U_{\text{уск}} = 60$ кВ; $V_{\text{св}} = 57$ м/ч; частота развертки 800—1000 Гц; амплитуда развертки 0,6—0,8 мм. Аналогичные тавровые соединения стрингерных панелей толщиной 2,2 и 2,8 мм из сплавов 1423, 1430, 1460 сваривают постепенно двумя угловыми швами с двух сторон ребра при угле наклона пучка 25—30° и минимальном проплавлении листа панели или односторонним швом с полным проплавлением ребра на всю толщину за один проход при угле наклона пучка 20°. Параметры режима: $U_{\text{уск}} = 60$ кВ; $V_{\text{св}} = 60$ м/ч, сканирование траектории развертки — окружность с большим тепловложением по сторонам шва; частота 1000 Гц; амплитуда 2—2,5 мм. Такие особенности процесса, как сварка «на весу» без формирующих устройств и подкладок, а также пространственное положение шва (вертикальное, горизонтальное) обеспечивают двухсторонний выход паров и газов из канала проплавления.

На параметрах режима, приведенных в табл. 14, можно выполнять разнообразные швы — стыковые, нахлесточные, угловые, прорезные и т.п.

С увеличением тока луча глубина и ширина проплавления возрастают, при повышении ускоряющего напряжения глубина проплавления также растет, при увеличении скорости сварки с 20 до 80 м/ч ширина проплавления уменьшается в 1,3—1,5 раза, одновременно уменьшается глубина провара. Чтобы сузить зону термического влияния, используют оплавляемые накладки, располагаемые над стыком со стороны луча и прижатые к свариваемым пластинам. Такие накладки, выступая присадочным материалом, не только отводят теплоту, но и служат экраном для периферийных электронов, благодаря чему снижается разогрев участков, прилегающих к зоне термического влияния.

Металл шва, сваренный электронным лучом, менее склонен к хрупкости при низких температурах, чем основной в закаленном и искусственно состаренном состоянии. Термическая обработка соединений после сварки улучшает их качество.

1.11. Гибридная сварка

Гибридная сварка — это современный способ соединения деталей с помощью двойного действия источника теплоты. Суть ее в том, что сварочная дуга импульсного действия и луч лазера действуют совместно на свариваемых деталях на некотором расстоянии друг от друга в пределах общей сварочной ванны (рис. 1.8).

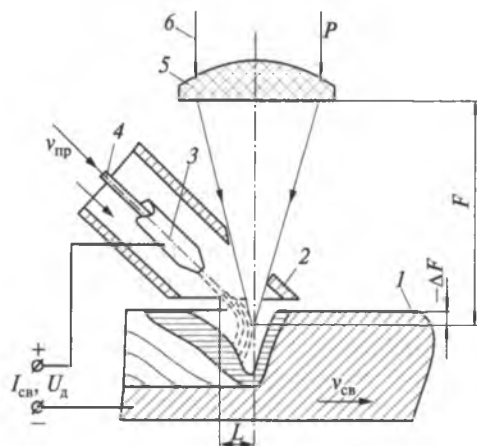


Рис. 1.8. Схема гибридной лазерно-дуговой сварки алюминиевых сплавов:

1 — деталь; 2 — защитное сопло; 3 — медный токоподводящий мунштук; 4 — присадочная проволока; 5 — фокусирующий объектив с фокусным расстоянием F ; 6 — лазерное излучение мощностью P ; ΔF — заглибление горловины каустики излучения относительно поверхности детали; L — расстояние между концом плавящегося электрода и осью лазерного излучения

При этом соотношение мощности лазерного излучения и сварочной дуги находится в пределах от $1/1$ до $1/1,5$. Взаимодействие лазерного луча и дуги плавящегося электрода рождает резонансные явления в сварочной ванне, за счет чего можно значительно повысить проплавляющую способность лазерной составляющей при увеличении ее поглощающей части благодаря дуговому подогреву, регулировать термический цикл процесса, повысить скорость сварки в несколько раз. С целью уменьшения экранирования излучения и соответственно глубины проплавления защиту сварочной ванны осуществляют смесью аргона и гелия или чистым гелием и используют импульсную модуляцию лазерного излучения. Металл, расплавленный дугой, поглощает лазерное излучение значительно интенсивнее, чем твердый металл, что способствует снижению потерь мощности сравнительно с лазерной сваркой.

Процесс сварки завершается выключением импульсной дуги плавящегося электрода, после чего через 1–2 с выключается лазерное излучение, что позволяет точно определить положение сфокусированного лазерного луча относительно зоны действия импульсной дуги L (рис. 1.8). Наибольшая глубина проплавления достигается при $L = 2–4$ мм.

Например, сплав Д16 сваривают с использованием проволок СвАМг6 и СвАК5 гибридной сваркой на параметрах режима: $I_{св} = 185–200$ А; $U_d = 21–22$ В; $P = 4$ кВт.

1.12. Электрическая контактная сварка

Электрическая контактная сварка алюминия и его сплавов, как и электродуговая, требует механической и химической подготовки поверхностей перед сваркой.

Зачистка листовых элементов перед точечной и шовной сваркой осуществляется с обеих сторон на ширине 30–50 мм в местах расположения сварных точек или швов. Детали для стыковой сварки зачищаются по торцам и на участках в местах закрепления в зажимах сварочной машины. Наилучшие результаты достигаются при химической зачистке – травлении 10–15 мин в специальных ваннах после обезжиривания при $T = 17–25$ °С в водном растворе концентрированной ортофосфорной кислоты H_3PO_4 с добавкой 0,1–0,3 % (по массе) хромпика $K_2Cr_2O_7$ и последующей просушкой горячим воздухом при $T = 70–80$ °С. После травления допускается хранение деталей перед сваркой до 72 ч при использовании сварочных машин переменного тока и до 24 ч при сварке запасенной энергией.

Специфические электротеплофизические свойства свариваемых металлов создают дополнительные трудности. Вследствие высокой электрической проводимости в контакте между электродом и деталью металл перегревается и возможно их приваривание. Во избежание этого сварка ведется через специальные теплоизолирующие прокладки из стали 12Х18Н9 толщиной 0,2–0,5 мм, которые устанавливаются между электродом и алюминиевыми деталями. Дополнительно можно

использовать модулирование импульса сварочного тока с постепенным его нарастанием и спадом. Минимальное выделение теплоты в контакте электрод—деталь достигается интенсивным водоохлаждением электрода и применением специальных материалов, электрическая проводимость которых не должна быть ниже 85–90 % такого показателя для меди (табл. 15).

Пригодность электродных сплавов для сварки тех или других металлов оценивается по показателям их износостойкости. Этот показатель определяется по числу точек, которые были сварены до 20%-ного увеличения диаметра рабочей поверхности электрода (табл. 1.23), по числу удовлетворительно сваренных точек к перезатачиванию электродов, по падению горячей или холодной твердости, по потерям массы, длины или объема электрода после выполнения определенного числа точек, по изменению прочности точек, по числу точек, которые свариваются, к следующей зачистке поверхности электрода, или по числу сварных точек на 1 мм износа рабочей части электрода и т.п.

Таблица 1.23. Долговечность некоторых электродных материалов

Металл деталей, которые свариваются	Материал электродов	Долговечность	
		А	Б
Сплав АМГ6	Бр.Кд I	50–70	1000–2000
Сплав МА2	Бр.Кд I	10–30	1000–2000

Примечание: А — число сварных точек до критического загрязнения поверхности электрода; Б — число сварных точек до 20%-ного повышения диаметра рабочей поверхности электрода. Листы, которые сваривались, имели толщину 1,5 + 1,5 мм.

Необходимо также обеспечивать небольшое и постоянное электрическое сопротивление пленки оксидов на поверхности изделия: при сварке на машинах переменного тока 100–300 мкОм, при использовании запасенной энергии (машины конденсаторной сварки) не более 100 мкОм; контактное сопротивление измеряется микроомметром типа М246 или другими приборами, предназначенными для измерения малых сопротивлений. Контроль качества подготовленной поверхности осуществляется путем сжатия детали между электродами.

Вторая трудность связана с высокой теплопроводностью алюминия, вследствие чего теплота быстро отводится от места сварки и рассеивается в свариваемом металле, а околочечная зона разупрочняется, причем ее размеры зависят от времени сварки. Поэтому сварку нужно вести на жестких режимах — при большом токе и малом времени его протекания 0,08—0,3 с, для чего используются мощные однофазные конденсаторные и низкочастотные сварочные машины, а также машины с выпрямленным током во вторичном контуре.

Для сварки используются электроды со сферической рабочей поверхностью:

Толщина металла, мм	1	2	3
Радиус сферы электрода, мм	75	100	150

Детали, собранные под сварку, должны плотно прилегать друг к другу; допустимый зазор — не больше 0,3 мм на длине 100 мм. Параметры режима точечной сварки алюминия и его сплавов на разных машинах приведены в табл. 16—18.

При точечной сварке разноименных алюминиевых сплавов в связи с разницей в электрической проводимости, температуре плавления и механических свойствах сварочное ядро относительно плоскости соединения листов располагается несимметрично. Аналогичным образом влияет разная толщина свариваемых деталей. Поэтому в таких случаях целесообразно применять электроды разных диаметров, с разными значениями теплопроводности и электрической проводимости, разными радиусами заточки, а также регулировать интенсивность теплоотвода в электроды, например, размещая между электродом и тонкой деталью тепловые экраны-пластинки из материала с высоким электрическим сопротивлением и температурой плавления (сталь типа 18—8). При протекании тока экран нагревается и разогревает свариваемые детали, так что расплавление начинается с поверхности тонкой детали и распространяется в толстую деталь. В результате действия сварочного тока разрушается оксидная пленка в контакте деталь—деталь и образуется общая ванна жидкого металла. При сварке поверхность электрода деформируется вследствие нагрева и высокого давления, на нее налипают частицы свариваемого металла, а на

поверхности деталей — частицы меди, поэтому рабочие поверхности электродов требуют зачистки после постановок 200–300 точек. Наличие теплового экрана предотвращает загрязнение электродов.

Параметры режима точечной сварки разноименных и разнотолщинных алюминиевых сплавов приведены в табл. 19.

Сварка алюминиевых сплавов толщиной более 1–1,5 мм выполняется по циклограмме с повышенным «ковочным» усилием. При налаживании машин на рабочий режим сварки цветных металлов и различных сталей и сплавов полезно применять также графические зависимости, представленные на рис. 1.9. Например, для деталей из сплавов на основе Cu, Al и Mg толщиной от 0,5 до 2,5 мм значения сварочного тока $I_{св}$ находятся в области, прилегающей к верхней линии графика, для сплавов на основе Fe, Ni и Te — в области, близкой к нижней линии.

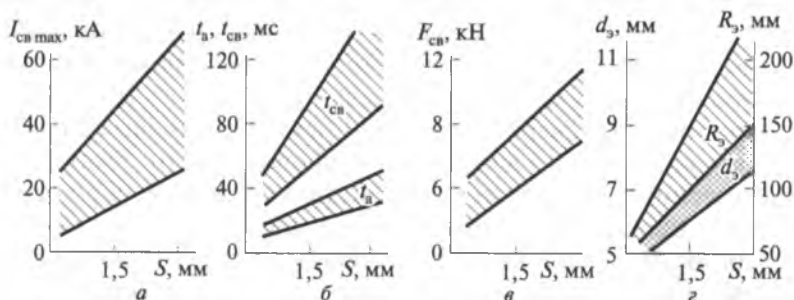


Рис. 1.9. Зависимости тока сварки $I_{св max}$ (а), времени нарастания до амплитудного значения t_a и $t_{св}$ (б), усилия сжатия $F_{св}$ (в), размеров электродов d_2 и R_2 (г) от толщины деталей S (от 0,8 + 0,8 мм до 2,5 + 2,5 мм) для конденсаторных сварочных машин средней и большой мощности

Микросварка — соединение деталей толщиной до 0,5 + 0,5 мм — выполняется на особенно жестких параметрах режима сварки преимущественно с помощью конденсаторных машин или машин постоянного тока. Особенная жесткость сварочных импульсов при ограниченных усилиях на электродах (табл. 20, 21) является причиной возникновения выплесков, массопереноса, а также значительных колебаний прочностных характеристик соединений.

Чтобы достичь стабильных показателей микросварки, повышают требования к предварительной подготовке поверхно-

стей электродов и деталей, обеспечивают соосность электродов, используют сварочные машины с особенно жесткими хоботами вторичных контуров и безынерционными приводами сжатия.

Оценить параметры режима точечной микросварки можно с помощью графиков, показанных на рис. 1.10. Для деталей из алюминиевых, медных и магниевых сплавов максимальный ток сварки $I_{св\ max}$ находится ближе к верхней области графика, для сплавов на основе железа, никеля или титана — в области, близкой к нижней линии.

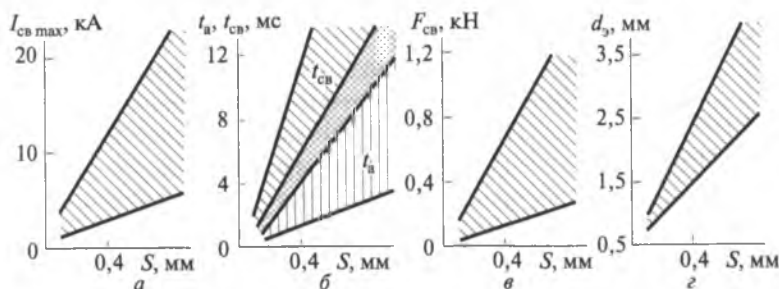


Рис. 1.10. Зависимость тока микросварки $I_{св\ max}$ (а), времени нарастания до амплитудного значения t_a , общей продолжительности сварки $t_{св}$ (б), усилия сжатия деталей $F_{св}$ (в), диаметра рабочей части электродов d_2 (г) от толщины деталей ($S = 0,5-0,7$ мм) для машин конденсаторной сварки малой мощности

Длительности нарастания тока до амплитудного максимального значения t_a и общего времени сварки $t_{св}$ для магниевых, алюминиевых и медных сплавов находятся на графиках ближе к нижней линии, для сталей и сплавов на железной, никелевой или титановой основе — ближе к верхней линии этого графика.

Шунтирование тока во время конденсаторной микросварки слабо влияет на качество соединений, если расстояние между точками не меньше указанного в табл. 1.24.

При *точечной сварке* алюминиевых сплавов образованные точки имеют высокую прочность на срезание, но низкое на отрыв.

При сварке плакированных алюминиевых сплавов АМгб, Д16АТ и т.п. возникает особый вид дефекта — частичное расплавление плакированного слоя, когда плакировка сохраняется на периферии ядра, поэтому перед сваркой плакировку надо

удалять либо использовать ультразвуковые колебания, при наложении которых осуществляются зачистка и улучшение контакта, ядро при сварке начинает формироваться из периферии контакта, что приводит к полному расплавлению плакировки на границе литого ядра и основного металла и соответственно к исключению дефекта непровара.

Таблица 1.24. Допустимые минимальные расстояния между точками при конденсаторной микросварке

Металл	Число деталей в пакете	Наименьший шаг точек, мм, при толщине каждой детали, мм							
		До 0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Никель, титан	3	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,5	8,0	11,0
Латунь, бронза	2	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,5	—	—
Мельхиор	3	2,0	2,5	3,5	5,0	6,0	8,0	—	—
Алюминий	2	2,5	3,0	4,0	5,5	7,0	8,0	—	—
Алюминиевые сплавы	3	3,0	4,0	5,0	7,5	10,5	12,0	—	—

Параметры режима сварки на конденсаторной точечной машине МТК 8004, оснащенной специальным ультразвуковым узлом, приведены в табл. 1.25.

Таблица 1.25. Ориентировочные параметры режима контактной точечной сварки плакированных алюминиевых сплавов с использованием ультразвуковых колебаний

Толщина металла, мм	$R_{сф}$	$I_{св}, \text{кА}$	$t_{св}, \text{с}$	Усилие на электродах, даН		Начало действия ковочного усилия, с	Ультразвуковые колебания	
				сварочное	ковочное		Время действия, с	Амплитуда, мкм
0,5 + 0,5	50	17,5	0,012	180	—	—	0,30	5
0,8 + 0,8	50	23,0	0,014	200	400	0,05	0,40	6
1,0 + 1,0	75	26,0	0,040	400	700	0,06	0,60	8
1,5 + 1,5	75	36,0	0,050	500	700	0,10	0,75	8
2,0 + 2,0	100	43,0	0,090	700	1500	0,10	0,95	9

Для повышения статической, циклической прочности и коррозионной стойкости сварных точечных соединений используются клеи, грунты и пасты. Так, при сварке тонколистовых листов из сплава 01430 применяется клеевая композиция на эпоксиполиуретановой основе, которая содержит порошки меди и магния и наносится на свариваемые кромки толщиной 0,1–0,3 мм. Начальное контактное сопротивление уменьшается благодаря разрушению слоя клея и увеличенному до 13–15 кН сжатию деталей перед сваркой (при сварке сжатие меньше – 7–8,5 кН). После сварки на машине МТК 50 прочность сварного соединения на 15–20 % больше, чем при обычной технологии.

Другой способ повышения качества сварных точечных соединений из сплава АМгб предусматривает размещение между двумя листами толщиной 1,8 мм ленты толщиной 0,05 мм из сплава – припоя системы Al–Ge–Si, Al–Y–Si и Впр27 как материалов-свидетелей для оценивания качества сварной точки с помощью рентгенографии. Благодаря близким температурам плавления материалов-свидетелей и основного металла материал ленты не проникает в литую зону ядра точки, материал припоя содействует лучшему смачиванию краев зазора, где формируется галтель на периферии ядра точки – пропаянный поясок контакта, который надежно защищает сварное соединение от влияния внешней среды, повышая коррозионную стойкость и общую прочность на 7–15 %.

Чтобы улучшить качество контактной точечной сварки, на место образования сварной точки наносят порошкообразную прослойку из самофлюсующегося хромоникелевого сплава ПГ-СР с высоким удельным сопротивлением. Вследствие резкого увеличения контактного сопротивления на границе деталь – деталь прослойка мгновенно расплавляется, вытесняется с интенсифицированием конвективного разогрева основного металла в зоне сварки. Это особенно полезно при сварке сплавов с высокими показателями теплопроводности и электрической проводимости. Поверхностные пленки (оксиды, остатки плакировки, другие загрязнения) полностью разрушаются и перераспределяются в жидком металле, а разрушенные нерастворенные частицы концентрируются на периферийной части расплава. Легирующие элементы прослойки Mn, Si, В

осуществляют нейтрализацию остатков, обеспечивая формирование качественного металла ядра.

Компоненты сплава ПГ-СР перед сваркой смешиваются с токопроводящими связующими (вода, глицерин) до пастообразного состояния и наносятся шпателем слоем толщиной до 0,3 мм. При сварке алюминия марки А5 толщиной 0,2 мм на машине МТ 1928 параметры режима такие: $I_{св} = 15-20$ кА; $t_c = 0,3-0,5$ с; $t_{ков} = 0,2-0,4$ с; $d_3 = 16$ мм; радиус сферы 80 мм.

1.13. Шовная сварка

Шовная сварка широко применяется при изготовлении герметичных изделий — емкостей, баков, цилиндрических сосудов, труб и т.п.

Подготовку деталей к шовной сварке выполняют так же, как при точечной. Более жесткие требования предъявляются к очищению поверхностей деталей. Сварка недостаточно чистых деталей сопровождается повышенным шунтированием тока, что снижает качество сварного соединения.

При сборке деталей под шовную сварку не допускаются большие зазоры, так как они способствуют перегреву, продавливанию и короблению деталей, а очень плотное прилегание предопределяет шунтирование тока.

Коробление деталей уменьшают прихватками. Шаг между прихватками составляет 80—150 мм, но для получения герметичных швов шаг между прихватками уменьшают до 30—60 мм. Точки прихватки должны быть без глубоких вмятин, не более 15 % толщины детали и располагаться по оси будущего шва. Прихватки выполняют сварочным током, на 10—20 % меньшим, чем ток во время точечной сварки этого же изделия. Не допускаются внешние и внутренние выплески. Выплески, которые возникают на поверхностях прихваток, тщательно зачищают.

Протяженные швы прихватываются от центра к краям поочередно, начиная от участков с повышенной жесткостью. Обечайки прихватываются поочередно точками, которые располагаются диаметрально противоположно. Если зазоры ока-

жуются большими, то детали прокатывают стальными роликами. Простые детали при сборке жестко фиксируются с помощью устройств и свариваются без прихватки.

Шовная сварка ведется по нахлестке или по отбортовке. Размеры нахлестки выбираются по табл. 1.26.

Таблица 1.26. Размеры нахлестки шовных сварных соединений

$S = S_1$, мм	d , мм, не ме- нее	Однорядный шов B , мм, не менее		$S = S_1$, мм	d , мм, не ме- нее	Однорядный шов B , мм, не менее	
		Стали и сплавы на основе FeNi и Ni, титановые сплавы	Спла- вы Al, Mg, Cu			Стали и сплавы на основе FeNi и Ni, титановые сплавы	Сплавы Al, Mg, Cu
Группа соединений А				Группа соединений Б			
0,3	2,5	6	10	Более 0,3	1,5	4	6
0,3–0,4	2,5	7	10	0,3–0,4	1,7	5	7
0,4–0,6	3,0	8	10	0,4–0,5	2,0	6	8
0,6–0,8	3,5	10	12	0,5–0,6	2,2	7	9
0,8–1,0	4,0	11	14	0,6–0,8	2,5	8	10
1,0–1,3	5,0	13	16	0,8–1,0	3,0	9	12
1,3–1,6	6,0	14	18	1,0–1,3	3,5	10	13
1,6–1,8	6,5	15	19	1,3–1,6	4,0	11	14
1,8–2,2	7,0	17	20	1,6–1,8	4,5	12	15
2,2–2,7	7,5	19	22	1,8–2,2	5,0	13	16
2,7–3,2	8,0	21	26	2,2–2,7	6,0	15	18
3,2–3,7	9,0	24	28	2,7–3,2	7,0	17	20
3,7–4,0	10,0	28	30				

Примечания. 1. d — расчетный диаметр литого ядра точки или ширина литой зоны. 2. Группа соединений определяется при проектировании в зависимости от требований к сварной конструкции и особенностей технологического процесса сварки.

Легкие сплавы на основе алюминия и магния свариваются 1) прерывистым и 2) шаговым способом. При первом способе детали перемещаются относительно электродов маши-

ны непрерывно, а сварочный ток включается импульсами продолжительностью $t_{\text{имп}}$, чередующимися с паузами $t_{\text{п}}$, в результате чего исключается перегрев свариваемых деталей и уменьшается износ электродов. При втором способе включение сварочного тока и перемещение деталей выполняются поочередно: сварка осуществляется при неподвижных деталях, а их перемещение — при отключенном токе и постоянном давлении.

Параметрами режима шовной сварки являются: сила сварочного тока $I_{\text{св}}$, продолжительность его протекания $t_{\text{св}}$ и продолжительность паузы $t_{\text{п}}$, усилие сжатия электродов $F_{\text{св}}$, скорость сварки $V_{\text{св}}$ и размеры электродов. Силу сварочного тока выбирают в зависимости от толщины, физико-механических свойств металла деталей и скорости сварки. В связи с шунтированием сила тока принимается на 15–25 % выше, чем при точечной сварке. Продолжительности импульсов сварочного тока $t_{\text{св}}$ и пауз $t_{\text{п}}$ между ними зависят от силы и рода тока, а также от скорости сварки $V_{\text{св}}$. Продолжительность пауз для алюминиевых сплавов $t_{\text{п}} = (1,5 - 1,2) t_{\text{св}}$.

Усилие сжатия $F_{\text{св}}$ зависит от толщины, жесткости, механических свойств металла детали и ограничивается стойкостью электродов и мощностью привода вращения машины. Скорость сварки $V_{\text{св}}$ выбирают с учетом перекрытия точек и расстояния между ними. Максимальное ее значение ограничено скоростью нагрева и кристаллизации сварочной ванны.

Параметры режима шовной сварки выбирают согласно табл. 1.27, 1.28.

Таблица 1.27. Ориентировочные параметры режима прерывистой шовной сварки алюминиевых сплавов

Толщина детали, мм	Ток сварки, кА	Продолжительность, с		Усилие сварки, даН	Скорость сварки, м/мин
		действия тока	паузы		
0,6	26	0,04	0,08	270	0,75
1,0	32	0,06	0,10	340	0,70
1,5	38	0,06	0,18	430	0,65
2,0	41	0,08	0,24	490	0,50

Таблица 1.28. Ориентировочные параметры режима шовной сварки алюминиевых сплавов на машинах с выпрямлением тока во вторичном контуре

Толщина детали, мм	Ток сварочный, кА	Продолжительность, с		Усилие сварки, даН	Скорость сварки, точек/мин
		сварки	паузы		
0,5	29	0,06	1	300	200
0,8	32	0,1	1,5	400	150
1,0	36	0,12	1,5	500	150
1,2	38	0,14	2	600	120
1,5	41	0,16	2,5	700	120
2,0	48	0,18	3,5	1000	100
3,0	61	0,24	4,5	1500	70

Примечания. 1. Рабочая поверхность электродных роликов радиусная.
2. Детали толщиной не менее 3,0 мм свариваются с прерывистым включением тока, шаговым способом с прерывистым вращением роликов и постоянным усилием сварки.

Размеры рабочей части электродов зависят от толщины и конструкции свариваемых деталей (табл. 1.29). При уменьшении диаметра роликов до 250–300 мм возрастает их износ.

Таблица 1.29. Ориентировочные размеры электродов шовных машин

Толщина детали, мм	Толщина электрода B , мм	Ширина рабочей поверхности электрода b , мм	Радиус закругления R_3 , мм
0,3	6	3	15–25
0,5	6	4	25–50
0,8	10	5	50–75
1,0	10	5	75–100
1,2	12	6	75–100
1,5	12	7	100–150
2,0	15	8	100–150
2,5	18	10	150–200
3,0	20	10	150–200

Примечание. При сварке плоских деталей одинаковой толщины устанавливаются электродные ролики одинаковых диаметров (сверху и снизу) – 250–400 мм.

При сварке кольцевых швов ролик внутри изделия должен быть меньшего диаметра, чем извне, что обеспечивает равномерную плотность тока и тепловых потоков в контакте электрод — деталь.

Детали из высокоэлектропроводных металлов (при соотношении толщин 1:2) свариваются с расплавлением обеих деталей. Если эти соотношения большие, то осуществляются такие же технологические меры, что и при точечной сварке.

Электроды со сферической поверхностью используются при сварке медных, алюминиевых и титановых сплавов.

Деформации и внутренние напряжения после шовной сварки уменьшаются чаще всего путем обкатки швов стальными роликами или термической обработки.

1.14. Стыковая сварка

Стыковая сварка алюминия и его сплавов выполняется как сопротивлением, так и оплавлением. Подготовка деталей к сварке состоит в придании их торцам определенной формы и тщательной очистке их поверхностей, как и для точечной сварки. С целью равномерного нагревания и одинакового пластического деформирования во время осаживания торцы деталей специально обрабатывают. Форма и размеры сечения заготовок после обработки должны быть одинаковыми или отличаться не больше, чем на 15 %, а толщины — соответственно на 10 %.

Сварка сопротивлением характеризуется высокой плотностью сварочного тока и скоростью нагрева, что требует большей мощности, чем при сварке сталей.

Рабочими параметрами режима стыковой сварки являются: усилия нагрева или программа изменения усилия во время сварки, ток сварки, продолжительность нагрева, установочная длина и усилие зажатия деталей в губках — электродах сварочной машины. Для повышения устойчивости деталей и локализации деформации в зоне сварки между губками машины используются изолированные вставки. Перед установкой концы деталей выпрямляют в губках-электродах.

Обычно установочная длина детали l_1 составляет $(0,8-1,0)d$, где d — диаметр детали, которая сваривается, мм. Минимальная установочная длина деталей компактного сечения выбирается в соответствии с площадью их сечения:

Сечение детали S , мм ²	25	50	100	250
Установочная длина $(l_1 + l_1)$, мм	3 + 3	4 + 4	4 + 4	6 + 6

Усилие сварки выбирается из условий обеспечения оптимального распространения температур в деталях.

Сварочный ток выбирается с учетом площади поперечного сечения и свойств свариваемого металла.

Усилие осадки определяет припуск — величину пластического деформирования деталей, а также качество очистки стыков от оксидов. Усилие зажатия деталей в губках сварочной машины во избежание проскальзывания должно быть в 2–3 раза большим, чем усилие осадки.

Тонкостенные трубы диаметром 120 мм и прутки из алюминиевых сплавов (Д1, Д16, Д18 и В65) хорошо соединяются стыковой сваркой сопротивлением с принудительным формированием и без последующей термической обработки металла стыков (табл. 1.30, 1.31). Соединение проволок из алюминия возможно и на обычном оборудовании.

Таблица 1.30. Ориентировочные параметры режима стыковой сварки проволоки и прутков из алюминиевых сплавов с принудительным формированием стыков

Марка сплава	Диаметр прутка, мм	$U_{\text{зх}}, В$	Плотность тока, А/мм ²	Припуск на сварку $\Delta_{\text{св}}, мм$	Припуск на подогрев, $\Delta_{\text{под}}, мм$	Давление подогрева, МПа	Давление осадки, МПа
АМГ6	8	2–2,44	81–96	11–12	2,8–3,2	7–9	210
	13	2,5	63–69	16–16,5	2,5–3	10–14	870–890
	8	2–2,44	80–98	9–10	2–3	8–9	210
Д16	13	2,7	65–70	16–17	3–4	11–14	870–900
	8	2,44	87–102	10–11	2,2–3,5	8–9	210
Д18	13	3,2	80–82,5	16–17	5–6	11–15	860–900

Таблица 1.31. Ориентировочные параметры режима стыковой сварки с последующим холодным деформированием

Металл	Диаметр проволоки, мм	Машина сварочная		Режим сварки		Режим упрочнения			Показатели прочности	
		для сварки	для упрочнения	Ток сварочный, кА	Усилие осадки, кН	Припуск на осадку под током, мм	Начальное расстояние между губками, мм	Усилие деформирования, кН	После сварки $\sigma_{св}$, МПа	$\sigma_{св}/\sigma_{нач}$
АО	4,5	МС-403	МСХС-5-3	3,6	5	4	9	35	160	1,0
АО	3,55	То же	То же	2,9	4	3	7	35	165	1,0
Алп	3,55	»	»	2,9	4	3	7	35	170	0,95
Алп	2,4	»	»	1,9	3,5	2	5	35	170	0,92
ПАМ-8 (заготовки Al-Cu)	8	МСС-4501	МСС-4501	10,2	6,5	8	16	35	180	0,95

Примечание. МСХС-5-3 — машина стыковой холодной сварки; $\sigma_{св}$, $\sigma_{нач}$ — прочность металла до сварки и после нее.

Сварка осуществляется на оборудовании для стыковой сварки сопротивлением. Зона разупрочнения располагается между стальными зажимами машин для стыковой холодной сварки или мощной машины электрической контактной сварки, которые имеют режущие края на подвижных и неподвижных зажимах, и подвергается деформированию в осевом направлении до полного сближения режущих краев. Грат и утолщение после деформирования устраняются. Параметры режима сварки по такой схеме приведены в табл. 1.31.

Соединение проволоки из алюминиевых и некоторых других сплавов можно выполнять сопротивлением с расплавлением металла стыка при минимальном сжатии торцов деталей последующим вытеснением жидкого металла во время осадки и деформированием разупрочненной зоны в горячем состоянии. Ориентировочные значения главных параметров режима сварки по этой схеме приведены в табл. 1.32. Сварочный ток $I_{\text{св}}$ для повышения производительности увеличивается относительно минимального значения тока I_0 для цветных металлов в 1,5–2 раза.

Таблица 1.32. Ориентировочные значения главных параметров режима сварки

Материал	Отношение установочной длины l_1 , мм, к диаметру проволоки d , мм	Отношение минимального тока I_0 , А, к диаметру проволоки d , мм	Давление при нагреве, МПа
Сплав АМг5	0,8–1,0	450	3–5
Сплав АВ	0,8–1,0	680	3–5
Медь М1	1,25–2,5	900	6–8

Припуски для сварки алюминиевой проволоки должны быть $(0,5–0,8)d$, для медной – $(0,3–0,5)d$. Наибольшая установочная длина ограничивается величиной $(1,8–2,0)d$ для алюминия, $(1,8–2,3)d$ для меди. Усилие зажатия проволоки должно в 2–3 раза превышать усилие осадки.

После сварки стык термообрабатывается пропуском через него дополнительного тока $I_{\text{т}} = (0,6–0,9)I_{\text{св}}$. В некоторых случаях с целью улучшения микроструктуры металла к стыку прикладывают усилие осадки в 5–10 раз больше обычного.

Стыковая сварка оплавлением наиболее эффективна для алюминия и его сплавов, потому что при этом процессе исключается окисление металла в стыке.

Основными параметрами режима сварки непрерывным оплавлением за исключением фазы подогрева являются: скорости оплавления $V_{\text{опл}}$ и осадки $V_{\text{ос}}$, напряжение холостого хода трансформатора $U_{2\text{хх}}$, плотность тока $j_{\text{св}}$ или ток сварки — оплавления $I_{\text{св}}$, припуски на оплавление $\Delta_{\text{опл}}$ и осадки $\Delta_{\text{ос}}$, время оплавления $t_{\text{опл}}$ и время осадки под током $t_{\text{ост}}$, усилие $F_{\text{ос}}$ или давление осадки $P_{\text{ос}}$, установочная длина деталей l_1 , усилие зажатия заготовок в губках электродов $F_{\text{зж}}$.

При сварке с подогревом дополнительными параметрами режима являются ток импульса подогрева $I_{\text{под}}$, его продолжительность $t_{\text{имп}}$, продолжительность фазы подогрева $t_{\text{под}}$, количество импульсов подогрева n или температура подогрева $T_{\text{под}}$. При сварке с программным управлением устанавливают программу изменения $U_{2\text{хх}}$ при сварке импульсным оплавлением, а также частоту и амплитуду колебаний подвижной плиты сварочной машины. Некоторые рекомендации относительно выбора параметров стыковой сварки оплавлением приведены в табл. 1.33—1.35.

Таблица 1.33. Ориентировочная плотность тока оплавления и осадки при стыковой сварке некоторых металлов и сплавов

Свариваемые детали	Материал	Плотность тока при сварке, А/мм ²		Плотность тока при осадке, А/мм ²
		средняя	максимальная	
Прутки диаметром 6–30 мм, штабы и трубы со стенкой толщиной 2–6 мм	Алюминиевые сплавы	20–35	25–45	130–170
	Медные сплавы	25–40	30–50	200–300
Штабы, трубы, прутки	Алюминиевые сплавы	5–12	10–20	60–80
	Медные сплавы	15–20	15–25	100–200

Таблица 1.34. Давление осадки, МПа, при сварке оплавлением некоторых металлов и сплавов

Металл	При сварке непрерывным оплавлением	При сварке оплавлением с подогревом
Алюминий АД1	120–150	—
Алюминиевые сплавы	130–200	—
Медь	250–400	—
Латуни	140–180	—
Бронзы	140–180	—
Титановые сплавы	30–100	30–40

Таблица 1.35. Ориентировочные параметры режима стыковой сварки оплавлением заготовок из алюминиевых сплавов

Марка сплава	Толщина поло- сы, мм	Уста- новоч- ная длина, мм	Припуск на оп- лавлени- е, мм	Продол- житель- ность оплавлени- я, с	Сред- няя ско- рость оплавлени- я, мм/с	При- пуск на осад- ку, мм	Ско- рость осад- ки, мм/с	Удель- ное давлени- е, МПа
АМг6	5–8	45	22	7	8	6–8	150	160
Д16	3–5	30	15	3	11	5–6	150	100
АК6	4–6	14	10	1,8	7	7–8,5	100– 150	180– 215

Ориентировочные параметры режимов стыковой сварки заготовок из сплава АМг6 большого сечения импульсным оплавлением приведены ниже:

Сечение, мм ²	12 000
Напряжение холостого хода $U_{2хх}$, В:	
максимальное	13,2
минимальное	8,0
Припуск на оплавление $\Delta_{опл}$, мм	45
Частота колебаний, Гц	3,5
Амплитуда колебаний, мм	0,3
Скорость колебаний, мм/с	13,0
Скорость осадки, мм/с	45
Продолжительность сварки, с	120
Мощность, кВт·А	200

Для алюминиевых сплавов средняя скорость оплавления составляет 3–7 мм/с, перед осадкой 8–15 мм/с, а скорость осадки не превышает 100–200 мм/с.

Традиционная технология сварки сопротивлением и оплавлением сплавов типа дюралюминия не обеспечивает высокого качества вследствие действия высоких температур и свободной осадки на этой стадии без тока, когда образуются расслоения и микронесплошности по границам зерен, а также дефекты в зоне термического влияния. При нагреве выше 505 °С осуществляется оплавление границ зерен, образуются эвтектики, интенсивно растет зерно. Чтобы этого избежать, нагревают металл в припуске на сварку, который выдавливается на периферию соединения и подрезается кромками формирующего устройства, отделяется от изделия, и его теплота не влияет на металл сварного соединения. Основным требованием при нагреве является обеспечение его равномерности в припуске на сварку с максимальным накоплением в нем теплоты до 75–85 %. После закрытия зазора происходит интенсивная деформация металла в припуске на осадку, которая сначала до 50–70 % припуска происходит под током, а потом без него (ковка).

При сварке толстых и разнотолщинных деталей выполняется предварительный подогрев заготовки импульсным током или путем пропускания непрерывного тока большой плотности (табл. 22).

При таком ведении процесса возможна сварка разных групп сплавов – термоупрочняемых и упрочненных наклепом (Д16Т + АМг6, Д16Т + АК6 и т.п.).

Стыковая микросварка различается по видам источника питания – конденсаторная (энергия накапливается в конденсаторах) и аккумуляторная (энергия накапливается в магнитном поле), а также по состоянию металла в зоне сварки – без расплавления или с непрерывным оплавлением деталей, в том числе дугowymi или искровыми разрядами конденсаторов с ударной и безударной осадкой.

Основными параметрами режима стыковой микросварки являются емкость конденсаторов, напряжение их зарядки, сопротивление цепи разрядки конденсаторов, коэффициент трансформации сварочного трансформатора, усилие осадки деталей на конечной фазе сварки, установочная длина деталей,

количество энергии, которая накапливается для сварки, и скорость перемещения сварочной головки (табл. 1.36,  23).

Таблица 1.36. Ориентировочные параметры режима стыковой микросварки со-
противлением проводов из алюминия и латуни

Металл проволоки	Диаметр про- волока, мм	Общая устано- вочная длина $l + l$, мм	Степень трансформатора	Усилие осадки, даН
Латунь Л63	0,6	2	6	6,0
Алюминий АД1	0,58	3	7	0,6

После сварки устраняют грат и усиление, выполняют правку и нагревание деталей с целью улучшения структурного состояния металла.

Чтобы улучшить качество стыковых соединений сплавов АД0, АМг6, 1420 контактной стыковой сваркой сопротивлением, между свариваемыми деталями размещают наноструктурную Al—Ni- и Al—Cu-фольгу толщиной 10—15 мкм. Их наличие приводит к высококонцентрированному выделению теплоты в зоне соединения, вследствие чего время пропускания тока уменьшается на 0,3—0,5 с, а при использовании Al—Ni-фольги за счет протекания экзотермической реакции между алюминием и никелем выделяется дополнительная теплота. Сварку нужно вести со скоростью нагрева 500—750 °С/с, тогда реакция протекает полностью; при больших значениях скорости процесс идет со взрывом.

При сварке через Al—Cu-фольгу значительно снижается температура и сокращается время сварки. Это обусловлено активацией диффузионных процессов при образовании в фольге эвтектики Al—Al₂Cu с температурой плавления 518 °С, что особенно важно при сварке термически нестабильных алюминиевых сплавов. Параметры режима сварки: $P_{\text{уст. нагрева}} = 1,5\text{--}6$ МПа, $I_{\text{св. max}} = 8,3$ кА; $P_{\text{ос}} = 89\text{--}102$ МПа; плотность тока 54—75 А/мм²; $t_{\text{св}} = 1,5\text{--}2$ с.

Сварка в твердой фазе не предусматривает нагрева в зоне формирования сварного шва, хотя в некоторых случаях оно имеет место вследствие предварительного подогрева, которое содействует пластической деформации при меньших усилиях давления.

1.15. Холодная сварка алюминия и его сплавов

Холодная прессовая сварка алюминия и его сплавов выполняется на собранных встык или внахлестку деталях.

Свариваемые поверхности зачищают от загрязнений, обезжиривают путем обработки проволочной вращающейся щеткой, шабрения и т.п. Эффективно прокаливание деталей при $T = 350-400\text{ }^{\circ}\text{C}$, когда адсорбированные органические пленки выгорают на воздухе и улетучиваются. Окончательное сближение поверхностей на расстояние действия межатомных и межмолекулярных сил кристаллической решетки достигается при вдавливании пуансона на глубину, при которой вследствие пластической деформации образуется монолитное соединение. Внахлестку сваривают листы толщиной от 0,2 до 15 мм путем вдавливания в толщу металла с одной или двух сторон пуансонов разной формы (рис. 1.11), что является одним из параметров режима сварки; второй параметр — усилие сжатия.

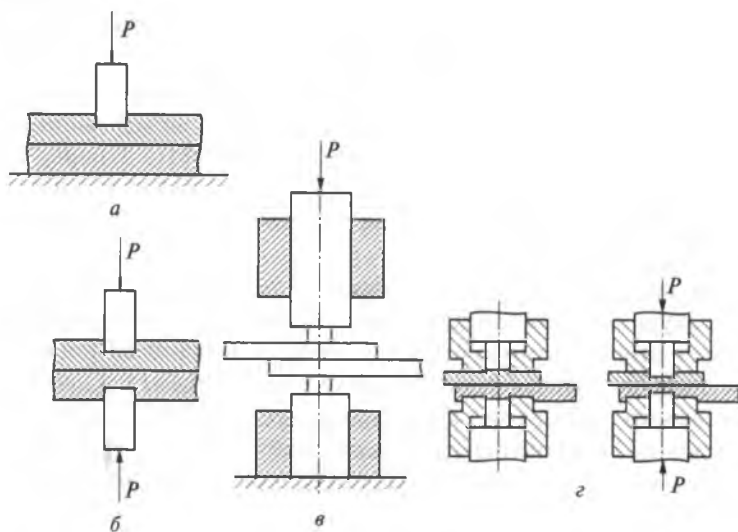


Рис. 1.11. Схемы холодной сварки внахлестку:

а — вдавливанием одного пуансона; *б* — вдавливанием изделия между двумя пуансонами; *в* — вдавливанием пуансонов с заплечиками; *г* — вдавливанием пуансонов с предварительным зажатием изделия

Соединения выполняются в виде отдельных точек или непрерывного шва. Ширина или диаметр пуансона v определяются в зависимости от толщины свариваемого металла: $v = (1-3)\delta$, где δ — свариваемая толщина.

Соединения, полученные путем вдавливания пуансонами с заплечиками, имеют большую прочность благодаря увеличенной площади поверхности взаимодействия.

Эффективность холодной сварки оценивается деформацией металла в месте соединения и зависит от свойств материала, типа соединения, толщины деталей и способов подготовки поверхности. Так, для чистого алюминия относительная глубина вдавливания $\epsilon = h/b$ составляет 55–60 %, для алюминиевых сплавов 75–80 %, где h — глубина вдавливания пуансона при сварке внахлестку; b — толщина металла.

Удельное давление должно обеспечить разрушение оксидных пленок, причем сравнительно с деформированием чистого алюминия для его сплавов этот показатель увеличивается в 1,5–2 раза.

Способность к холодной точечной сварке оценивается условным понятием «свариваемость», которое определяется либо так:

$$S = \frac{h}{\delta_1 + \delta_2} 100\%,$$

где h — остаточная толщина между пуансонами, мм; $\delta_1 + \delta_2$ — суммарная толщина свариваемых деталей, мм; либо как отношение необходимой деформации к начальной толщине свариваемых деталей:

$$\Sigma = \frac{2\delta - h}{2\delta} 100\%.$$

Свариваемость зависит от рода металла, формы и размеров пуансонов, толщины деталей и т.п. и при равных условиях (толщина металла и его структурное состояние, форма пуансонов, скорость деформирования) является величиной постоянной и определяется высотой рабочей части пуансонов. Глубина вдавливания пуансонов должна быть небольшой, чтобы не ослаблять сечение свариваемых деталей и не ухудшать внешний вид изделий. Холодной сваркой можно получить монолитные

соединения металлов и сплавов в однородных и разнородных комбинациях (табл. 24).

Оптимальные показатели свариваемости и прочности достигаются, когда рабочие части пуансонов обеспечивают необходимую интенсивность течения металла и распределение удельных давлений на соединяемых поверхностях.

В зависимости от конструкции и формы пуансонов конфигурация сварных точек может быть прямоугольной, с развитым периметром, круглой, фигурной, с усилением и т.п. Простейшей является круглая форма пуансона с плоской или сферической формой торца. Прочность сферических точек возрастает от центра к периферии, при этом высота центральной части пуансона должна быть 75–85 %, а высота по периметру 60–70 % толщины свариваемого алюминия (табл. 1.37). Надо предотвращать резкие переходы в точках, чтобы не было концентраторов напряжений. Параметры режима сварки приведены в табл. 1.37.

Таблица 1.37. Ориентировочные параметры холодной сварки алюминия сферическими точками (H, h – максимальная и минимальная высота пуансона)

Марка алюминия; толщина, мм	Размеры пуансонов $d \times H \times h$, мм	F , кН
A1; 1,5	3×1,2×0,95	200
A1; 1,5	4,5×1,2×0,95	31,5
A1; 1,5	6,0×1,35×1,1	52,5
A2; 3,0	6,5×1,9×2,35	55,0
A2; 4,0	7×2,7×3,1	60
A2; 4,0	10×2,6×3,1	100
A2; 4,0	12×2,6×3,1	142
A2; 4,0	14×2,6×3,1	155
A2; 5,0	8×3,0×3,8	100
A2; 5,0	12×3,0×3,8	125
A2; 6,2	8×3,75×4,7	110
A2; 8,0	8,6×4,9×5,9	125
A2; 8,0	10×5,0×6,2	110
A2; 8,0	10×5,0×6,2	110
A2; 8,0	16×5,0×6,2	175

С целью увеличения площади сечения точки, которая воспринимает нагрузку на срез и отрыв, она выполняется с усилением, благодаря чему создаются более жесткие условия напряженного состояния путем ограничения течения металла между сдавливающими пуансонами, которые могут быть разных форм и размеров (табл. 25).

У отдельных участков точек свариваемость достигает 45–55 %, тогда как при обычной сварке 30 %. Такие точки обеспечивают равнопрочность соединения с основным металлом, и разрушение образцов происходит за пределами точек по основному металлу.

При сварке тонкого металла нужно применять пуансоны, которые обеспечивают получение точек с развитым периметром. Так, при сварке листов из сплава АД1 толщиной 0,3–0,8 мм применяются пуансоны не с плоской поверхностью, а с небольшой конусностью до 7° , что увеличивает протяженность зоны сварки и прочность сварной точки. Другие варианты сварки приведены в табл. 1.38.

Таблица 1.38. Ориентировочные параметры режима холодной сварки алюминиевых штабов точками с развитым периметром

Толщина металла, мм	Форма пуансонов	F , кН
1	Крестообразный	22
1,5	То же	31
1,5	Двутавр	42,5

Точечная сварка алюминиевых сплавов затруднена деформированием менее пластичных и более прочных сплавов, что требует больших усилий сжатия, возможно меньшего диаметра рабочей части пуансона, при этом ширину прямоугольных пуансонов выбирают близкой к толщине свариваемых листов, острые кромки скругляют, а прямоугольную форму точки меняют на эллиптическую.

Применение обжатия вокруг сдавливающих пуансонов позволяет повысить прочность точек сплавов на 10–15 % и избежать образования трещин, уменьшить коробление и разрушение последующими точками предыдущих. Обжатие производится кольцом, диаметр которого равен 3–5 диаметрам

пуансонов, под давлением не менее 100–150 МПа. Этот эффект достигается благодаря увеличению объемного сжатия и периферийного провара.

Если обжатие осуществить трудно, можно применить фиксирующие устройства, которые предотвращают коробление деталей, и вести сварку прямоугольными точками шириной, равной толщине свариваемого металла или близкой к ней.

С учетом приведенных выше рекомендаций можно получить качественное соединение на параметрах режима, приведенных в табл. 1.39.

Таблица 1.39. Ориентировочные параметры режима холодной точечной сварки алюминиевых сплавов

Марка сплава	Толщина металла, мм	Форма и размер точки, мм	F , кН
АМг2М	2	Круглая, $d = 5$	60
АМг2М	2	Круглая, односторонняя $d = 5$	80
АМг2М	2	Круглая, односторонняя с повышенной остаточной толщиной, с обжатием $d = 5$	100
Д16АМ	2	То же	100
АМг5ВМ	3	Прямоугольная, $4 \times 12,5$	175
АМг5ВМ	3	Односторонняя, $4 \times 12,5$	185

Холодная шовная (роликовая) сварка алюминия и его сплавов. Такая сварка выполняется по механической схеме беспрерывной точечной сварки прямоугольными пуансонами.

Ролики имеют кольцевые выступы, играющие роль пуансонов при точечной сварке, а также опорные поверхности, ограничивающие углубление рабочих выступов и создающие напряженное состояние в зоне сварки. Собранные внахлестку защищенные детали зажимаются между роликами и сжимаются ими до полного погружения выступов в металл, после чего ролики приводятся в движение. При перемещении деталей они последовательно рабочими выступами осуществляют интенсивную деформацию металла, в результате чего последовательно образуется сварной шов.

Двухсторонняя сварка выполняется одинаковыми роликами, а односторонняя — разными роликами, один из которых

имеет выступ высотой, равной сумме выступов при двухсторонней сварке, а второй ролик является опорным, без рабочего выступа. Этот способ применяется при сварке разнородных металлов, когда рабочая часть ролика вдавливается в более твердый металл.

При шовной сварке алюминия (рис. 1.12) рекомендуются ролики таких размеров: диаметр 50δ , ширина рабочего выступа $a = (1-1,5)\delta$, высота рабочего выступа $h = (0,8-0,9)\delta$, ширина опорной части $s = (2-4,5)\delta$, где δ — толщина металла.

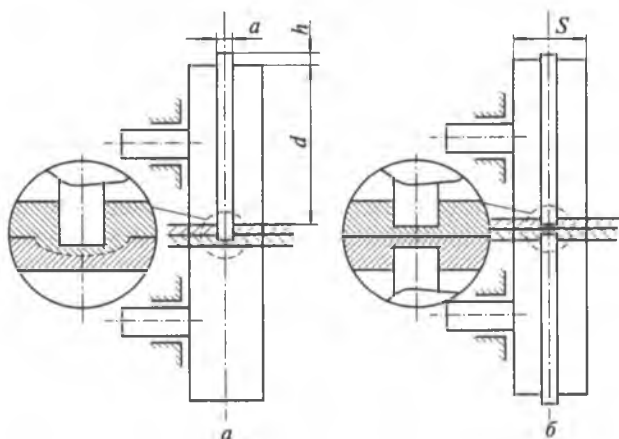


Рис. 1.12. Схема холодной шовной сварки:

а — с односторонним деформированием; б — с двухсторонним деформированием

Сварка алюминия толщиной 1 мм при свариваемости 27 % выполняется со скоростью 48–72 м/ч. Чем больше диаметр роликов, тем легче достигается необходимый провар. Прочность на разрыв сварных соединений, когда шов расположен перпендикулярно оси растяжения, составляет 65–85 % прочности основного металла; важно другое свойство — герметичность, что для слабонагруженных изделий вполне достаточно.

Холодная стыковая сварка стержней, штабов, профилей и проводов из алюминия и его сплавов осуществляется сжатием свариваемых элементов сразу после обрезания их торцов. Свариваемость определяется чистотой соединяемых поверхностей, направлением кристаллических связей и уровнем напряженного состояния. Поэтому нужно тщательно обезжирить и

сгладить грубый рельеф свариваемых торцов, которые должны быть перпендикулярны оси деталей, иначе возможны непровары.

Специальная подготовка припусков на сварку выполняется путем увеличения их сечения за счет предыдущей посадки или запрессовки обжимного кольца. Эти меры применяются для обеспечения достаточной жесткости, повышения напряженного состояния и получения стабильно высокого качества соединения, особенно при сварке низкопластичных материалов.

Холодная сварка выполняется с помощью разных прессов в специальных зажимных устройствах с гнездом, соответствующим форме и размерам свариваемых деталей.

Цикл холодной стыковой сварки определяется следующими параметрами: припуски на сварку или установочная длина $l_1 + l_2$, усилие зажатия, усилие и скорость осадки, число осадок. Зажатие деталей осуществляется гидравлическим, пневматическим, пневмогидравлическим, клиновым и пневморычажным приводом.

Надежное зажатие с помощью конусов достигается при рифлении гнезд зажимов и при предварительном или постоянной торцевом прижиге конусов в гнезда. Нужно обеспечить, чтобы усилие зажатия было намного большим усилия осадки. Для наиболее надежной клиновой системы зажатия с общим углом клиньев $14-24^\circ$:

$$F_3 \geq (1,45-1,6) F_{oc},$$

где F_3 — усилие зажатия; F_{oc} — усилие осадки.

Для гарантированного глубокого и стабильного провара припуски на сварку алюминия нужно устанавливать с некоторым запасом, т.е. с превышением того минимального значения, при котором получается провар; иногда $l_1 = l_2 = (1,25-1,5)d$, но при этом необходимо обеспечить деформацию симметрично оси свариваемых деталей. Для ответственных изделий лучше осуществлять двойную осадку, чем верхний предел припуска на сварку. При сварке деталей с различной механической прочностью более мягкий стержень должен иметь больший вылет, чем твердый. Если ведется сварка деталей разных диаметров или толщин, осуществляется предварительная посадка более тонкой детали, иногда в том же самом

устройстве для сварки. Припуски на сварку плоских деталей устанавливаются пропорционально их толщине. Поскольку их жесткость больше, чем у круглых деталей, припуски должны быть также большими, однако штабы толщиной 1,5–2 мм надежнее свариваются с предыдущей посадкой: при этом утолщение припусков на сварку составляет 1,5–2 толщины штаба.

В зависимости от способа предыдущей обработки металла максимальное усилие осадки различается (табл. 26).

После глубокого отжига соединения становятся намного прочнее основного металла благодаря измельчению зерна в околошовной зоне.

Трудности при холодной стыковой сварке алюминиевых сплавов обусловлены пониженной пластичностью сплавов и их повышенной твердостью и прочностью. Поэтому в зависимости от свариваемости и пластичности применяются следующие технологические приемы:

- ♦ сплавы с достаточной пластичностью (АМг, АМц) свариваются с помощью двухкратной, а иногда однократной осадки в зависимости от масштабного фактора и структурного состояния;
- ♦ сплавы с умеренной пластичностью или пластичные тонкие с малой жесткостью припусков нуждаются в специальной подготовке деформируемых частей методом предварительной посадки. При этом возможен предварительный подогрев свариваемых концов при посадке и высадке так, чтобы нагретые части упрочнились в процессе сварки. При сварке сплавов разных составов и сечений их части готовят так, чтобы выравнивалась интенсивность деформаций при сварке;
- ♦ сварка сплавов с очень низкой пластичностью (до 6 %) возможна лишь при использовании специальных обжимных втулок или при двойной осадке и предварительной подготовке утолщенного вылета. Параметры режима сварки некоторых алюминиевых сплавов приведены в табл. 27.

При сварке деталей с большими сечениями необходимо увеличивать усилие осадки и усилие зажатия при обязательном условии $F_3 > F_{oc}$, а припуски на сварку уменьшать. Формирование постепенно изменяется — от затруднения до облегчения деформации, что обеспечивает свариваемость и пластичность соединений (табл. 1.40).

Таблица 1.40. Ориентировочные параметры холодной стыковой сварки металлов больших сечений

Металл и размер деталей, мм	Вид подготовки	$l_1 + l_2$, мм	$P_{ос}$, кН
АО, $d = 30$	Без подготовки	31 + 31	750
М1, $d = 25,5$	Посадка концов	29 + 29	1850
М1, $d = 30$	Без подготовки	36 + 36	2000
А1, 18×100 + М1, 16×100	То же	27 + 22	2160
АМц, $d = 25$	Напрессовка кольца	26 + 26	1300
М1, $d = 20,5$ + АМц, $d = 24$	То же	24 + 27	1470
АМг3, $d = 25$	— >> —	27,5 + 27,5	1480

Прессовая сварка алюминия и некоторых его сплавов выполняется с предварительным подогревом свариваемых деталей: АД1 до 350–400 °С, АМг3 до 400–430 °С, АМг5 до 430–450 °С, АМг6 до 450–480 °С; удельное давление достигает 1500 МПа. После подогрева свариваемые поверхности и те, что выступают из зажимов, зачищают проволочными щетками. Длину выступающих концов выбирают такой, чтобы при полной усадке площадь свариваемой поверхности увеличилась вдвое. При этом поверхностные пленки загрязнений и включений удаляются с gratом, а зона соединения характеризуется мелкозернистой структурой с высокими механическими свойствами.

Холодная сварка проволок внахлестку выполняется вдавливанием плоского пуансона, который приводит к поперечной и продольной деформациям, определяемым ходом пуансона. Возможна также схема, когда проволока фиксируется канавками, а степень деформации регулируется упорами. Нахлестка проволок составляет 2,5–3,5 их диаметра. Монолитное соединение достигается при общей остаточной толщине 0,5–0,6 отожженной алюминиевой проволоки и 0,4–0,5 диаметра наклепанной. В процессе сварки происходит искажение формы проволоки, но площадь ее сечения почти не меняется. Прочность на разрыв таких соединений составляет 55–60 % этого показателя для основного металла, разрушение имеет место по линии сварки; такое соединение плохо работает на изгиб. Электриче-

ский контакт достаточно надежен. Сварка ведется в специальных формирующих устройствах, которые имеют плоскости торможения и свободного течения, расположенные под углом к горизонтали, а за ними специальные ножи для отрезки выдавленного металла. Зона сварки имеет эллиптическую форму с меньшей осью в направлении силы сжатия, характеризует остаточную толщину и свариваемость: если она составляет 0,7–0,8 диаметра проволоки, свариваемость считается достаточно высокой. На режимах сварки, приведенных в табл. 1.41, достигается прочность сварных соединений, близкая к прочности основного металла.

Таблица 1.41. Ориентировочные параметры режима холодной сварки алюминиевых и медных проволок внахлестку (l – размер нахлестки)

Марка металла	d , мм	l , мм	$F_{\max}$, кН	Вид предыдущей обработки заготовки
АО	2	6,5	17	Без обработки
АО	2	6,5	15,5	Отжиг
А1	3,5	8,5	31,5	Без обработки
А1	3,5	8,5	28	Отжиг
А1	4,5	10,8	43	Без обработки
А1	4,5	10,8	38,5	Отжиг
М1	1,5	6	31	То же
М1	2,5	7,5	41,5	— >> —
М1	3	9	95	— >> —
М1	4,5	14	136	— >> —

Холодная точечная сварка проволок, собранных внахлестку, выполняется при значительно меньших усилиях сжатия, и необходимая прочность достигается даже в простых винтовых или эксцентриковых ручных устройствах. Они позволяют выполнять сварку алюминиевых проволок диаметром до 6,5 мм; свариваемость составляет 15–20 % при ширине пуансона 0,3–0,5 диаметра проволоки и длине полученной точки 1,8–3 диаметра проволоки. Обычно 3–4 точки обеспечивают равно-

прочность соединения и требуемую электрическую проводимость в условиях статического нагружения.

Холодная сварка алюминиевых деталей, собранных втавр, используется для изготовления электротехнических изделий типа отводов — проволочных или штабовых. Этот способ объединяет части стыкового и точечного устройств: сварка выполняется при движении зажима с отводом к неподвижной шине, а формирующее устройство обеспечивает напряженное состояние и формирует прилив из вытесненного металла.

Припуск на сварку для круглых отводов из алюминия достигает 1,5–2 диаметра проволоки, для приварки штабов 2–2,5 их толщины, а глубина вдавливания пуансона в шину составляет 0,65–0,75 ее толщины. Форма пуансона отвечает форме привариваемого отвода. При использовании отводов в виде небольших шин применяют фигурные пуансоны, обеспечивающие повышенную остаточную толщину, благодаря чему формируется прочный шов, позволяющий отгибать отводы под любым необходимым углом, при этом прочность и электрическая проводимость обеспечиваются на заданном уровне.

Холодная сварка сдвигом осуществляется за счет интенсивной деформации в тонких поверхностных слоях с образованием отдельных зон схватывания, в которых действуют металлические связи между контактирующими металлами при одновременном их сжатии.

При сварке сдвигом работа деформации и силы значительно меньше, чем при других способах холодной сварки, так как деформируются тонкие слои и небольшие объемы металла. Схематично этот процесс представлен на рис 1.13.

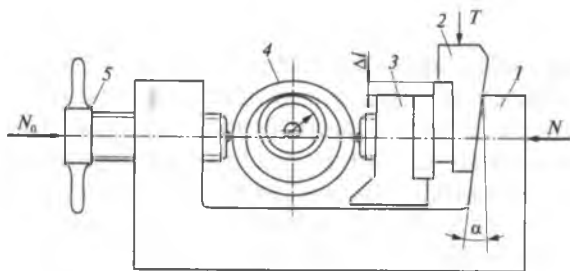


Рис. 1.13. Схема процесса холодной сварки сдвигом

В капсуле 1 размещены клин 2 и ползун 3, которые имеют гнезда для свариваемых деталей. Предварительно зачищенные в местах сварки детали закрепляются так, что деталь, расположенная в гнезде клина, смещена и имеет возможность сдвигаться на расстояние Δl . Сами детали предварительно сжимаются с помощью винта 5 нормальным усилием N_0 , которое передается на свариваемые детали через упругий элемент 4. Этот элемент после предварительной тарировки с использованием индикатора также служит динамометром, который показывает нормальную силу в любой момент цикла сварки. Тангенциальное усилие T прикладывается от источника сжатия — пресса, который снабжен прибором для определения силы сжатия. В процессе сдвига — перемещения детали клином возникают интенсивная взаимная деформация соединяемых поверхностей и рост нормального и тангенциального усилий, которые зависят от угла клина и характеристики упругого элемента. После выполнения сдвига на величину Δl изделие получает необходимую форму и размеры, шток пресса поднимается, ползун отводится и свариваемое изделие достают из устройства.

Основными параметрами режима сварки являются: угол клина или угол сдвига, предварительное сжатие свариваемых деталей N_0 , усилия N , T , сдвиг Δl , скорость сдвига V .

Параметры режима холодной сварки алюминия и его сплавов, которые обеспечивают достаточные свойства сварных соединений, приведены в табл. 1.42.

Таблица 1.42. Ориентировочные параметры режима холодной сварки сдвигом алюминия и его сплавов при угле сдвига 7°

Марка сплава	Сечение штаба, мм	Размер нахлестки, мм	Δl , мм	N_0	N	T
				кН		
А1	6×60	50	11	24	180	200
А2	4×40	30	7	12	84	104
А2	8×35	30	11	25	72	120
АМг3М	1×25	20	5,5	6,5	39	51
АМг3М	2×25	25	6	9	48	66
АМг3М	3×25	25	6,5	10	57	70

Окончание табл. 1.42

Марка сплава	Сечение штаба, мм	Размер нахлестки, мм	Δl , мм	N_0	N	T
				кН		
Д16АМ	2×25	25	6	9,5	48	67
Д16АО	2×25	25	6,5	11	50	69
Д16АМ	3×25	25	6	10,5	60	84
Д16АО	3×25	25	7	12,5	68	90
Д16АМ	4×30	35	7,5	18,5	92	128

В целом холодная сварка алюминия и его сплавов, этот простой, довольно надежный с малой энергоемкостью способ, используется в производстве бытовых изделий, в электротехнике, транспорте с помощью как стандартного прессового и прокатного оборудования с необходимым инструментом, так и специализированного.

Диффузионная сварка алюминиевого сплава АМгб толщиной 4 мм в вакууме выполняется с использованием промежуточных прослоек из металлов — меди, кремния толщиной 0,05 мм, которые образуют эвтектики с алюминием и легко диффундируют в основной металл; деформация при этом не превышает 3 %, а равнопрочность обеспечивается при длине нахлестки 15 мм. Предварительным ударно-волновым действием при давлении 6 ГПа можно повысить интенсификацию процесса сварки сплава Д16, а за счет увеличения дисперсности частиц продуктов распада после дальнейшей термической обработки улучшается качество соединения и достигается его равнопрочность с основным металлом.

1.16. Сварка трением

При сварке трением алюминия и его сплавов удовлетворительные результаты получают при оптимальных параметрах режима, обеспечивающих необходимую степень пластического деформирования нагретого металла (табл. 1.43).

Таблица 1.43. Ориентировочные параметры режима сварки трением алюминия и его сплавов

Марка	Диаметр стержня, мм	Относительная частота вращения, об/мин	Удельное давление, МПа		Осадка, мм	Время сварки, с
			при нагреве	при ковке		
АД1	20	3000	8	8	6—7	3
	40	760	30	30	30	10
Д1	40	760	100	100	20	13

При свободном формировании грата прочность соединений составляет 60–90 % прочности основного металла. При сварке принудительное формирование стержней одного диаметра из сплавов АМгб, АМгбН и Д16Т диаметром 10–30 мм обеспечивает прочность, равноценную прочности основного металла. Использование формирующих устройств с рабочим углом кромок 60–90° обеспечивает подрезание грата в его основании, благодаря чему полностью удаляются периферийные дефекты и непровары, что облегчает течение процесса и уменьшает износ рабочих кромок устройства.

Фрикционная сварка, или сварка трением с перемешиванием, — одна из разновидностей сварки трением. В этом процессе используется вращающийся с высокой частотой 1000–3000 об/мин пальцевый инструмент, который внедряется в глубь свариваемых деталей и, двигаясь вдоль свариваемых кромок с углом наклона вперед 2–3°, разогревает металл деталей до температуры сварки. Основные общие характеристики этого процесса приведены ниже.

Рабочий инструмент изготавливается из инструментальной стали Р6М5 с нанесенным слоем нитрида циркония или термически обработанным по особому режиму. Диаметр основы наконечника 3,2–3,6 мм; диаметр вершины наконечника 2,4–2,6 мм; его длина составляет 0,9–0,95 толщины свариваемого металла; диаметр буртика 10–12 мм; на рабочей поверхности буртика выполнена полусферическая или коническая канавка — углубление для плавного и непрерывного перемешивания пластифицированного металла и формирования качественной лицевой поверхности шва.

Усилие прижима инструмента к поверхностям свариваемых деталей и его перемещения составляет 5–10 кН и зависит от свойств материала, его толщины и скорости сварки; глубина погружения инструмента в стык 0,8–0,9 толщины свариваемых деталей; частота вращения инструмента 1000–3000 об/мин, скорость сварки 4–40 м/ч в зависимости от толщины и состава свариваемого металла. Сварка жестко зафиксированных деталей выполняется с использованием опорной подкладки с продольной канавкой под стыком шириной 4 мм и глубиной 0,5 мм, с низкой теплопроводностью для снижения стока теплоты. Обычно это нержавеющая сталь типа 18–8, на поверхность которой как барьерное покрытие нанесен слой нитрида циркония.

При этой разновидности сварки возможны следующие дефекты: несплавление, перегрев металла и грат на лицевой поверхности, несплавление в корне шва, внутренние несплавления и т.п. Поэтому при сборке деталей под сварку необходима высокая точность: смещение оси стыка относительно инструмента не больше 0,5 мм; зазор между кромками не более 0,3 мм; повышение кромок, или депланация, со стороны набегания инструмента не больше 25 %, а со стороны его отхода — 5 % толщины свариваемого металла. Впереди инструмента полезно устанавливать прижимный ролик, который препятствует короблению деталей.

Введение рабочего инструмента в стык можно осуществлять на технологических припусках, а после его вывода из стыка необходимо забивание финишного отверстия в конце шва.

Сварка качественных тонколистовых конструкций толщиной 1,8–2,5 мм из сплавов АМц, АД31, АМг2, а также сплавов разного легирования, например 1201 + АМг6, выполняется на параметрах режима: $n = 1420\text{--}2880$ об/мин; $V_{\text{св}} = 6\text{--}40$ м/ч; при сварке сложнелегированных сплавов $n = 1420$ об/мин; $V_{\text{св}} = 6\text{--}14$ м/ч.

Те же сплавы, но больших толщин 4–7 мм свариваются на параметрах $n = 800\text{--}1000$ об/мин; $V_{\text{св}} = 15\text{--}19$ м/ч. Такие соединения имеют прочностные характеристики на уровне 0,75–0,95 показателей для основного металла.

Способ позволяет выполнять не только прямолинейные швы, но и кольцевые на обечайках из сплава АМг6 на параметрах

режима, которые снижают его разупрочнение: $n = 800$ об/мин; диаметр бурта инструмента 12 мм; $V_{\text{св}} = 14$ м/ч.

Эта разновидность сварки алюминиевых сплавов весьма перспективна благодаря многим преимуществам по сравнению с другими способами, рассмотренными выше: не нужно придавать специальную форму кромкам и зачищать их поверхности от пленки Al_2O_3 , не нужны присадочный металл и защитный газ, возможно получение беспористых швов, сварку можно вести во всех пространственных положениях, отсутствуют дым, шум и ультрафиолетовые излучения, низкий уровень деформаций, шов формируется в твердой фазе, возможно получение крупных панелей, не нужны сварщики высокой квалификации и т.п.

Деформационное упрочнение швов при сварке трением с перемешиванием сложнолегированных алюминиевых сплавов АМг6М, 1420, 1201 и 1460 обеспечивает их более высокую прочность благодаря формированию в центральной части шва ядра с ультрадисперсной структурой, а в зоне термомеханического влияния — выгнутых, вытянутых и равноосных зерен, ориентированных в направлении движения инструмента. В результате измельчения зерен, увеличения объемной части их границ и измельчения интерметаллидных фаз их разупрочнение меньше, чем при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом.

Способ позволяет значительно экономить металл при изготовлении ребристых панелей. Если при традиционной технологии требуется фрезерование отлитой плиты, при которой коэффициент использования материала составляет 0,07–0,2, то при сварке сплава В95Т2 этот показатель можно повысить до 0,89–0,92.

1.17. Ультразвуковая сварка

Ультразвуковая сварка (УЗ) используется для соединения деталей из алюминиевых сплавов малых толщин.

В отличие от точечной контактной сварки при УЗ-сварке соединения получают в твердой фазе, при этом не образуется

четко обозначенная зона сплавления, твердость шва не отличается более чем на 10 % от твердости основного металла. Кроме того, процесс имеет низкую стоимость, причем при больших сериях изделий (больше 3000 точек) экономия еще больше, а швы характеризуются более высоким уровнем статической и динамической прочности. При испытании на отрыв разрушение идет с отрывом основного металла.

Наилучшие результаты достигаются при оптимальных параметрах режима сварки (табл. 1.44). При этом соединения имеют такую же прочность на отрыв, срез и выносливость, как и те, что были получены контактной точечной сваркой.

Таблица 1.44. Ориентировочные параметры режима УЗ-сварки алюминия и его сплавов

Марка сплава	Толщина деталей, мм	Усилие давления, кН	Время сварки, с	Амплитуда, мкм	Материал наконечника
АД1	0,5	0,3	0,15	10	Сталь 45
	1,0	0,6	1,0	15	
	1,5	0,9	2,5	15	
Д16	0,5	0,3	0,15	15	ШХ-15
	1,0	0,8	1,5	22	
	1,5	1,0	3,5	23	
Д16ч	0,8	0,9	2,0	22	ШХ-15
	1,0	1,1	2,5	22	
	1,5	1,3	3,0	22	
АМг6	0,5	0,5	1,5	18	Сталь 45
АМг3	0,8	0,8	0,5	22	
Д1	0,5	0,5	0,5	10	

1.18. Ремонтные работы

Ремонтные работы, которые проводятся на изделиях из алюминиевых сплавов, — заварка дефектов в сварных швах и отливках, наплавка износостойчивых сплавов на изношенные поверхности поршней двигателей внутреннего сгора-

ния, восстановление резьб и т.п., — предусматривают использование некоторых рассмотренных выше способов сварки.

Так, *дефекты в корне шва* изделия из сплава АМгб НПП в виде оксидных плен вырубаются механическим инструментом и подвариваются вручную вольфрамовым электродом в аргоне или в смеси $Ag + He$ с использованием присадочной проволоки СвАМг63 с добавкой 0,5 % скандия, что позволяет при одно- и двухкратной подварке получать мелкокристаллическую структуру. При этом прочность металла шва выше на 7—8 %, ударная вязкость в 1,5—2 раза, а угол изгиба — на 25—30 %, чем при использовании проволоки СвАМгб.

При аналогичных работах на изделиях из сплава 1420 число подварок не больше двух; при ремонте сложных жестких конструкций, особенно в зоне термического влияния, лучше применять проволоку марки СвАМг8, на жестких — проволоку марки СвАМг63.

Ремонт изделий из *литейных алюминиевых сплавов* сравнительно с деформированными связан с дополнительными трудностями:

- ♦ большее содержание легирующих элементов и примесей, вследствие чего увеличивается жидкотекучесть сварочной ванны и снижается температура ее плавления;
- ♦ более грубая макро- и микроструктура, содержащая больше интерметаллидов, неодинаково расположенных по объему изделия;
- ♦ большое количество растворенного в отливках газа, который при сварке вызывает порообразование.

Восстановление резьбовых отверстий в литых изделиях предусматривает такую последовательность операций:

- 1) расверливают изношенное отверстие до чистого металла;
- 2) зачищают прилегающую поверхность;
- 3) устанавливают и поджимают графитовое подкладное кольцо с углублением цилиндрической или конической формы, шириной больше диаметра отверстия на 4—6 мм, а глубиной 3—8 мм;
- 4) ведут импульсно-дуговое заплавление отверстий плавящимся электродом в инертных газах на режимах, приведенных в табл. 1.45, горелкой со специальной насадкой, которая обеспечивает постоянное расстояние между соплом горелки и по-

верхностью изделия; сварочная проволока выбирается в зависимости от марки сплава (табл. 2);

- 5) при диаметре отверстия 6–16 мм подают проволоку по его центру, а при больших размерах — ближе к его стенке с дальнейшим перемещением по кругу, завершая каждый слой в центральной части отверстия; нанесение каждого слоя выполняется через 2–4 с;
- 6) после заварки снимают подкладку, удаляют корень шва и выполняют необходимые работы по обновлению резьбы. Замена аргона гелием, предварительный подогрев до 110–120 °С значительно улучшают качество ремонта.

Таблица 1.45. Ориентировочные параметры режима импульсно-дуговой заварки отверстий диаметром 6–24 мм в алюминиевых сплавах

Защитный газ	$I_{св}$, А	U_d , В	$V_{пз}$, м/ч	$t_{св}$, с	$Q_{газа}$, л/мин
Аргон	340–370	29–32	600–720	2–4	12–15
Гелий	330–360	30–33	660–720	2–3	22–25

Примечания. 1. Диаметр электродной проволоки 1,6 мм. 2. Время заварки кратера 0,2–0,5 с. 3. Время продувки газа до сварки и после нее соответственно 0,5–1 и 1–2 с. 4. Вылет электродной проволоки 10–16 мм.

При заварке дефектов тонкостенных 0,3 мм алюминиевых конструкций, например штампованного листотрубного испарителя из сплавов АД0 или АД1, применяется трехфазная дуга вольфрамовыми электродами. Процесс ведется «на весу». Вольфрамовые электроды располагаются в горелке параллельно оси стыка, расстояние между ними — в пределах их диаметра, а плотность тока в них не превышает 20 А/мм². Чтобы не исказить сечение канала вследствие провисания металла ванны, применяется присадочная проволока диаметром 3 мм, которая поглощает значительную часть теплоты дуги благодаря экранирующему эффекту, а также подпору газов в каналах, которые образуются при сгорании излишков хладагента.

Для наплавки изношенных участков поршней двигателей внутреннего сгорания из сплавов АЛ25, АЛ10В, АЛ30 применяются как стандартные электродные материалы, так и специально разработанные.

Подготовка поверхностей поршней под наплавку включает расточку или травление в смеси кислот ($250 \text{ г HNO}_3 + 10 \text{ г/л HF}$) и промывание в воде.

Изношенные поршни из сплава АЛ25 наплавляются вручную неплавящимся электродом в аргоне и автоматически с подачей композитных проволок сплошного сечения марки Св01397 состава, % (по массе): Si 6–10, Cu 0,5–1, Mg 0,8–1,2, Mn 0,5–0,7, Fe 1–2, Ni 1,7–4,2, Zr 0,1–0,3, Ti 0,1–0,3, Sr 0,03–0,05, остаток Al, на параметрах режима: $I_{\text{св}} = 200 \text{ А}$, $U_{\text{д}} = 18\text{--}24 \text{ В}$, $V_{\text{н}} = 6\text{--}16 \text{ м/ч}$, $Q_{\text{Ар}} = 10\text{--}12 \text{ л/мин}$ и марки Св01349 состава, % (по массе): (Si 11–13, Cu 1–2,6, Mg 1–1,5, Mn 0,5–1, Fe 2,8–3,2, Ni 4,8–5,2, Zr 0,1–0,4, Ti 0,1–0,4, Sr 0,03–0,05, остаток Al, на параметрах режима: $I_{\text{в}} = 240\text{--}250 \text{ А}$, $U_{\text{д}} = 18\text{--}24 \text{ В}$, $V_{\text{н}} = 6\text{--}20 \text{ м/ч}$, $Q_{\text{Ар}} = 10\text{--}12 \text{ л/мин}$.

Двухкомпонентная система композитных проволок, состоящая из алюминия с распределенными в нем волокнами из никеля, к моменту введения в дугу является однородным раствором Ni–Al, а в электродной капле 60–70 % объема составляет фаза Ni_2Al_3 , остальное – соединения Ni_3Al , NiAl и Ni .

Сварочные проволоки перед применением 10 мин отжигают при температуре 300°C так, чтобы они были пригодны для использования 5 суток. Наплавку ведут за один оборот поршня, проволоку подают в сварочную ванну вслед за дугой, наплавку заканчивают после перекрытия валика на 10–15 мм, после чего подача проволоки прекращается и она отводится от изделия на 10–15 мм, а сварочный ток за 3–4 с уменьшается до 100–150 А для заварки кратера. После наплавки проводится термическая обработка по режиму: закалка 3 ч при 495°C , искусственное старение 10 ч при 180°C . Твердость металла зоны термического влияния повышается по сравнению с этим показателем для основного металла $\text{HB} = 107$.

Импульсно-дуговая наплавка поршней из сплава АЛ25 выполняется с применением порошковой проволоки-плющенко марки ПП-МА-5 сечением $1,5 \times 6 \text{ мм}$ на параметрах режима: $I_{\text{св}} = 260\text{--}280 \text{ А}$, частота импульсов 100 Гц, $I_{\text{max ампл}} = 750\text{--}950 \text{ А}$, $U_{\text{д}} = 22\text{--}24 \text{ В}$, $V_{\text{пз}} = 100\text{--}120 \text{ м/ч}$, $V_{\text{н}} = 20\text{--}25 \text{ м/ч}$, $Q_{\text{Ар}} = 9\text{--}11 \text{ л/мин}$. При наплавке на этих параметрах происходит мелкокапельный перенос металла (размер капель уменьшается

до 0,3–0,5 мм), отсутствует просыпание шихты и сохраняются все летучие элементы.

В состав шихты входят компоненты, улучшающие стабильность горения дуги, перемешивание сварочной ванны и ее дегазацию, а наличие модификаторов титана (0,08–0,11 %) и циркония (0,12–0,15 %) в наплавленном металле содействует получению мелкозернистой структуры и равномерному распределению избыточных фаз (пересыщенные легирующими элементами твердые растворы алюминия), что обеспечивает повышение износоустойчивости поршней в 1,4–1,6 раза.

Наплавка осуществляется по выступам между канавками. Металл не стекает, так как возможно его размещение с обеих сторон от перемычки в первую и вторую канавки. При этом скорость процесса на 40 % выше, чем при наплавке в канавку; кроме того, увеличивается коэффициент использования наплавочной проволоки, уменьшается зона разупрочнения вследствие снижения погонной энергии.

При *двухдуговой наплавке поршней* с использованием неплавящегося и плавящегося электродов предполагается поочередное и раздельное формирование дуг на каждом электроде с образованием совместной ванны расплавленного металла. Дуга неплавящегося электрода проплавляет тело изделия на необходимую глубину и ширину, а плавящимся электродом осуществляется комплексное легирование сварочной ванны элементами, содействующими упрочнению и увеличению износоустойчивости наплавленного металла. Неплавящийся электрод питается разнополярными импульсами преимущественно тока прямой полярности, а в перерывах между ними на плавящийся электрод подаются импульсы тока обратной полярности с амплитудой, в 1,5–2 раза большей амплитуды критического тока перехода к струйному переносу металла. Электродный металл поступает в сварочную ванну в виде перегретой парометаллической струи, которая способствует интенсивному перемещению металла и его дегазации, получению мелкозернистой структуры высоколегированного металла с равномерным распределением интерметаллидных фаз.

Наплавка поршней из жаропрочного литейного алюминиевого сплава АК19 (18,5 % Si, 1,3 % Cu, 1,2 % Mg, 1,1 % Ni, 0,6 % Fe, Al остаток) ведется электродной проволокой марки Св06Х18Н9Т

диаметром 1,2 мм на параметрах режима: диаметр вольфрамового электрода марки ЭВЛ 10 мм, эффективная сила тока наплавки неплавящимся электродом 160 А, средняя составляющая тока прямой полярности на неплавящемся электроде 210 А, средняя составляющая тока обратной полярности на неплавящемся электроде 180 А, средний импульсный ток на плавящемся электроде 120 А, $V_{пз} = 80$ м/ч, $V_{н} = 20$ м/ч, $Q_{Ag} = 22$ л/мин.

Технология наплавки состоит из трех этапов: 1) возбуждается дуга между вольфрамовым электродом и неподвижным поршнем при малых токах; предварительная разделка кромок на теле поршня не выполняется. После выхода на режим и образования ванны необходимой глубины включается вращение поршня; 2) осуществляется подача тока и электродной проволоки на период времени, когда поршень сделает полный оборот; 3) останавливается подача проволоки и заваривается кратер плавным снижением тока на неплавящемся электроде до полной остановки вращения поршня. Все операции выполняются автоматически по программе блока управления.

Напавленные таким образом поршни имеют увеличенный в 2–2,5 раза моторесурс.

Локальное укрепление литейных поршневых сплавов выполняется в три этапа: 1) скорость наплавки 130 м/ч, основной металл проплавляется на 0,8–1,0 мм, в напавленном металле содержится до 25–70 % железа; 2) скорость наплавки 80 м/ч, глубина проплавления 1,2–1,3 мм, напавленный металл обогащается алюминием; 3) скорость наплавки 40 м/ч, увеличиваются глубина провара и ширина валика. Зазор между торцом вольфрамового электрода марки ЭВИ и изделием составляет $4,5 \pm 0,4$ мм, диаметр сопла горелки 16 мм, $Q_{Ag} = 10$ –12 л/мин, электродная проволока марки Св08Г2С диаметром 1,2 мм, $I_{св} = (65-75)d$, для обеспечения струйного переноса металла.

Качественного заполнения узких полостей канавок в поршнях без механической разделки можно достичь, используя гибридный способ сварки — за счет фиксации электрической дуги на дне полости с помощью лазерного излучения. При этом наплавляемый металл не имеет пор и несплавлений в нижней части заправляемых канавок, а также уменьшается перегрев изделия. Так, поршни из сплава АМгб наплавляют в им-

пульсном режиме проволоками марок СвАМг6, СвАК5 диаметром 1,2 мм в аргоне и гелии с расходом каждого 8–10 л/мин при остальных параметрах: $I_{св} = 200–230$ А, $U_d = 22–24$ В, $V_{св} = 60$ м/ч. Дугу плавящегося электрода направляют на хвостовую часть ванны на расстоянии 1–3 мм от оси лазерного излучения по схеме на рис. 1.8 при угле наклона оси мундштука, подающего проволоку, к оси лазерного излучения 25–35°. Мощность непрерывного излучения CO₂-лазера составляет 1,5 кВт, а наибольшая мощность импульсно-периодического излучения Nd:YAG-лазера в пике импульса достигает 3 кВт. Такой характер излучения позволяет исключить эффект создания аргонной плазмы, поглощающей лазерное излучение и негативно влияющей на процесс наплавки.

Во время наплавки поршней полезно охлаждать бобышку для уменьшения зоны термического влияния.

1.19. Сварка трубопроводов из алюминия и его сплавов

Сварка трубопроводов выполняется аргонодуговым способом неплавящимся электродом на переменном токе или на постоянном токе обратной полярности дугой, стабилизированной скоростным потоком аргона. Основные типы и конструктивные элементы швов трубопроводов приведены в табл. 28. Кромки под сварку обрабатываются только механически, остающиеся подкладные кольца изготавливаются из материала той же марки, что и сами трубы. Угол скоса кромок в V-образных стыковых соединениях составляет 35°, а в U-образных 15°; радиус притупления не больше 1,5 мм. При сварке «на весу» зазор составляет 0–1 мм; при сварке на подкладном кольце 2,5–3,5 мм. В зависимости от типа шва и толщины стенки трубы ширина шва составляет 5–17 мм, а высота усиления 0,5–3 мм.

Марка сварочной проволоки выбирается в зависимости от марки свариваемых материалов, а в случае выполнения трубного узла из материалов разных марок выбирается проволока, рекомендуемая для сварки более прочного материала. При

выполнении прихваток (2–3 на одно соединение) нужно обеспечить провар корня шва без дефектов, а перед сваркой их надо тщательно зачищать шабером или металлической щеткой.

Для обеспечения сквозного проплавления стенки трубы каждый шов выполняется не менее чем в два прохода на параметрах режима сварки, приведенных в табл. 29. Первый проход выполняется без подачи сварочной проволоки или с малой ее подачей. При многопроходной сварке каждый дальнейший валик накладывается после охлаждения предыдущего до 50–60 °С.

Горелка располагается так, чтобы угол между вольфрамовым электродом и плоскостью, касательной к стыку в точке сварки, составлял 50–80°, а угол между присадочной проволокой и плоскостью, касательной к стыку в точке сварки, выдерживался в пределах 10–15° (рис. 1.14). Перемещение электрода (горелки) во время сварки должно быть равномерным без поперечных колебаний горелки и проволоки. Сварку стыковых швов целесообразно выполнять при горизонтальном положении трубы, а соединений внахлестку — при ее вертикальном положении. Сварку неповоротных стыковых соединений нужно выполнять короткими вертикальными швами на подъем, а сварку отростков с трубами нужно выполнять участками согласно рис. 1.15. Начала и концы всех участков швов перекрываются на длине 10–15 мм.

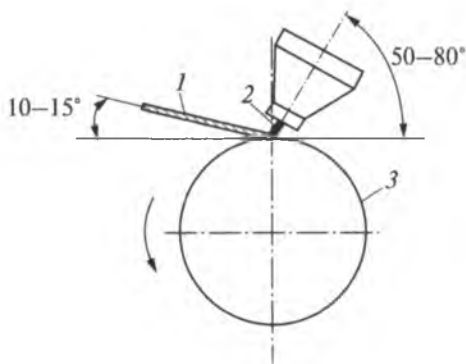


Рис. 1.14. Положение горелки и присадочной проволоки при сварке стыкового соединения:

1 — присадочная проволока; 2 — электрод; 3 — труба

По окончании сварки, а также при обрывах дуги ее нужно гасить плавно, постепенно уменьшая силу сварочного тока или плавно увеличивая длину дугового промежутка и скорость сварки. Для защиты остывающего металла шва от воздуха аргон подается в горелку 5–10 с после гашения дуги.

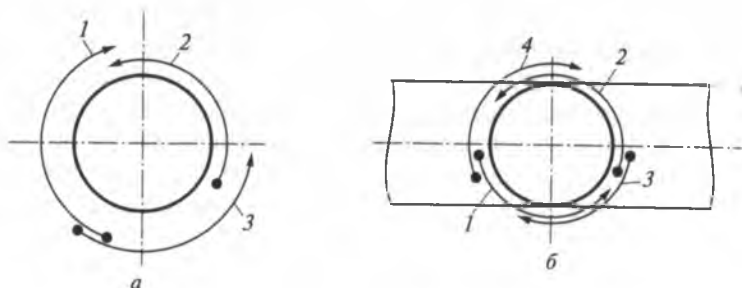


Рис. 1.15. Схема сварки неповоротных стыков трубы *a* и последовательность наложения швов при сварке отростка с трубой *б*:

1, 2, 3, 4 — последовательность и направление сварки

ГЛАВА 2 МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ

2.1. Маркировка и свариваемость материалов

Чистый магний не применяется для изготовления металлоконструкций вследствие малой прочности и недостаточной коррозионной стойкости. Поэтому используются сплавы магния с алюминием, марганцем и цинком и другими металлами, которые имеют большую в несколько раз вибрационную прочность по сравнению с алюминиевыми сплавами и сталями, что в сочетании с малой удельной массой позволяет их использовать в транспортном машиностроении. Для этого применяются как обрабатываемые магниевые сплавы, так и литейные. Поскольку собственная оксидная пленка магния не защищает от проникновения кислорода в глубь металла, его поверхность покрывается искусственной хроматной защитной пленкой.

Обрабатываемые магниевые сплавы маркируются в соответствии с ГОСТ 14957–76 так: МА1 (1,3–2,5 % Mn, ост. Mg), МА2 (3,0–4,0 % Al, 0,15–0,5 % Mn, 0,2–0,8 % Zn, ост. Mg), МА5 (7,8–9,2 % Al, 0,15–0,5 % Mn, 0,2–0,8 % Zn, ост. Mg), МА14 (5,0–6,0 % Zn, 0,3–0,9 % Zr, ост. Mg).

Литейные сплавы маркируются в соответствии с ГОСТ 2856–79 так: МЛ3 (2,5–3,5 % Al, 0,15–0,5 % Mn, 0,5–1,5 % Zn, ост. Mg), МЛ4 (5,0–7,0 % Al, 0,15–0,5 % Mn, 2,0–3,5 % Zn, ост. Mg), МЛ8 (5,5–6,6 % Zn, 0,7–1,1 % Zr, 0,2–0,8 % Cd, ост. Mg). Везде содержание компонентов — по массе.

При сварке магниевых сплавов и заварке дефектов литья возникают трудности металлургического и технологического характера.

Так, вследствие высокой химической активности во время сварки магниевые сплавы интенсивно окисляются, образуя тугоплавкую и нерастворимую в жидком металле оксидную

пленку MgO . Из-за большой разницы в температуре плавления чистого магния и его оксида (соответственно $680^\circ C$ и $2800^\circ C$), а также в 2 раза большей плотности пленки по сравнению с плотностью чистого магния происходит несплавление кромок основного металла с присадочным, а сварочная ванна загрязняется оксидом магния. Поэтому осуществляют защиту сварочной ванны от окружающего воздуха в основном инертными газами; разрушение оксидной пленки происходит на переменном токе по тому же механизму, что и при сварке алюминия.

Склонность к образованию пор у магниевых сплавов меньше, чем у алюминия.

Повышенная жидкотекучесть металла и потеря им прочности в интервале температур ликвидус—солидус требуют обязательного применения подкладок из меди или нержавеющей стали с формирующими канавками. Сами детали необходимо закреплять в кондукторах или других приспособлениях, фиксирующих их форму, для уменьшения деформаций, обусловленных высоким коэффициентом линейного расширения магниевых сплавов.

Магниевого сплавы проявляют высокую склонность к образованию горячих трещин из-за большого интервала начала и окончания кристаллизации и наличия низкотемпературных эвтектик, например: $Mg-Cu$ ($T_{пл} = 485^\circ C$), $Mg-Al$ ($T_{пл} = 436^\circ C$), $Mg-Ni$ ($T_{пл} = 508^\circ C$).

Эта трудность преодолевается путем реализации специальных технологических и конструктивных мер:

- ♦ технология изготовления сварного соединения должна предусматривать способ, режим сварки и охлаждения изделия, последовательность выполнения сварных швов в конструкции, при которых обеспечивается развитие минимально возможных усадочных и тепловых линейных деформаций при кристаллизации металла шва и охлаждении околошовной зоны;
- ♦ подогрев и отжиг, которые изменяют распределение собственных напряжений в сварных соединениях, снижая их до уровня, при котором металл шва становится более стойким против дальнейших превращений и одновременно более пластичным;

конструкция сварного соединения должна обеспечить достаточную податливость возникающим в процессе сварки деформациям в шве и зоне термического влияния.

Подготовка кромок под сварку включает как механическое удаление оксидной пленки, так и химическое воздействие на нее различными реактивами. Последнее используется при подготовке присадочного материала и выполняется по нескольким схемам.

Наиболее распространенная схема включает следующие операции: 1) химическое обезжиривание при температуре 60–90 °С в течение 5–10 мин в ванне такого состава: 20–30 г/л тринатрийфосфата $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$; 30–50 г/л кальцинированной соды Na_2CO_3 ; 20–50 г/л едкого натра NaOH ; 3–5 г/л жидкого стекла; 2) промывание 0,5–1 мин в проточной горячей воде при температуре 50–60 °С; 3) удаление защитного покрытия в течение 10–15 мин при температуре 70–80 °С в ванне с едким натром NaOH (200–300 г/л); 4) промывание в проточной горячей воде, как в п. 2; 5) промывание в холодной воде; 6) травление при комнатной температуре в течение 0,5–2 мин в ванне такого состава: 150–200 г/л хромового ангидрида CrO_3 ; 25–35 г/л азотнокислого натрия NaNO_3 ; 2–3 г/л фтористого кальция CaF_2 ; при этом за 1 мин снимается слой 2,5–3 мкм; 7) промывание в холодной проточной воде для удаления хромового электролита с поверхности деталей и присадочного материала; 8) сушка сжатым воздухом при температуре 60–90 °С.

Эти методы подготовки используются в условиях массового производства сварных узлов небольших габаритов. При сварке крупногабаритных изделий можно ограничиться шабрением. При сварке небольших узлов в серийном производстве сочетаются оба способа.

Сварочная проволока изготавливается из магниевых сплавов того же состава путем прессования, а для механизированной сварки прутки свариваются между собой и сворачиваются в бухту; очищается только травлением. Подготовленные таким образом материалы могут храниться 24 ч; если проволока сохраняется в кассете в сухом помещении, срок хранения может быть увеличен до 4 суток, а в герметичной таре — значительно дольше. Сварка ведется в основном с присадкой, изредка по буртику.

2.2. Газовая сварка

Газовая сварка магниевых сплавов выполняется нормальным пламенем мощностью $(75-100)S$, где S — толщина металла, левым способом и только в нижнем положении с применением флюсов из фтористых солей кальция, бария, магния, лития и т.п. (табл. 2.1), которые наносятся на кромки шва и на конец присадочного прутка. Флюсы разводят в емкости из нержавеющей стали дистиллированной водой до сметанообразного состояния (60 г флюса на 100 г воды).

Таблица 2.1. Флюсы для газовой сварки магниевых сплавов

Марка флюса	Состав, % (по массе)					
	CaF ₂	BaF ₂	MgF ₂	LiF	Na ₃ AlF ₆	MgO
ПО	18	35	26	23	—	—
МФ-1	25	30	10	15	20	—
ВФ-156	15	32	25	20	5	3

В качестве присадки используют прутки или «лапшу», вырезанную из листов того же состава.

Во избежание возгорания магния сварочную ванну полностью защищают флюсом. Детали толщиной более 5 мм требуют предварительного подогрева до 300–350 °С. Прочность сварных соединений составляет 60–80 % этого показателя для основного металла.

2.3. Аргондуговая сварка вольфрамовым электродом

Этот вид сварки позволяет выполнять все типы сварных соединений. Стыковые соединения свариваются на съемных медных или стальных подкладках с формирующей канавкой овальной или прямоугольной формы, размеры которой определяются толщиной металла: ширина 5–20 мм и глубина 1–2 мм. Плотное прижатие кромок к подкладкам обеспечива-

ется специальными приспособлениями. При отсутствии подкладок кромки прихватываются отдельными точками диаметром 10–12 мм на расстоянии 50–150 мм друг от друга.

Перед сваркой места прихваток зачищают стальными щетками, а усиление снимают заподлицо с основным металлом. Листы толщиной до 5 мм свариваются без разделки кромок; для более толстого металла (10–20 мм) выполняется V-образная разделка с углом раскрытия 50–60° и притуплением 2–6 мм; для металла толщиной более 20 мм – X-образная разделка с углом раскрытия 60–80° и притуплением 2–3 мм.

Диаметр присадки выбирают в зависимости от толщины свариваемого металла:

Толщина металла, мм	До 2	2–3	4–6	8	Более 10
Диаметр присадки, мм	1,5–2,0	2,0–2,5	2,5	3,0	3,0–4,0

Диаметр выходного отверстия сопла горелки выбирают в зависимости от силы сварочного тока:

$I_{св}$, А	50	100	200	300	Более 400
D_c , мм	8	8–10	10	14–20	20

Сварку ведут на минимальной длине дуги 1–1,5 мм вручную или автоматом на переменном токе. Процесс надо вести на большом токе и повышенной скорости сварки. При выполнении первого шва необходима защита корня шва аргоном (табл. 30). При многопроходной сварке тщательно зачищают предыдущий слой от черного налета оксида. Прочность сварного шва составляет 75–85 % прочности основного металла.

2.4. Сварка плавящимся электродом

Такая сварка применяется для соединения металла толщиной более 6 мм и выполняется в аргоне только на постоянном токе обратной полярности. Необходимо выдерживать следующее соотношение между диаметром присадки и силой сварочного тока:

Диаметр присадки, мм	0,8	1,2	1,6	2,0	2,5	3,2
$I_{св}$, А	160–165	180–200	220–265	270–300	320–350	420–440

Скорость плавления магниевой проволоки вдвое выше, чем алюминиевой, при той же силе тока, что учитывается в параметрах режима (табл. 31).

Лучшие результаты можно получить при сварке на параметрах режима, отвечающих струйному переносу электродного металла (табл. 2.2).

Таблица 2.2. Ориентировочные параметры режима механизированной сварки магниевых сплавов плавящимся электродом в аргоне

$d_э$, мм	$I_{св}$, А	$V_{пэ}$, м/ч	U_d , В	Q_{Ar} , л/мин
0,8	160–165	2400	25–26	7–8
1,2	180–200	1260	24–28	8–10
1,6	220–265	810	24–28	10–12
2,4	325–350	490	24–28	12–14
3,2	420–440	440	26–30	16–18

Импульсно-дуговую сварку рекомендуется выполнять в газовой смеси 75%Ar+25%He.

Магниевый сплав МА2–1 плохо сваривается из-за химической неоднородности металла шва, обусловленной оплавлением эвтектик по границам зерен твердого раствора и низкой пластичностью металла в зоне термического влияния при температуре выше 430 °С. Поэтому для его сварки рекомендуется использовать сварочную проволоку из сплава марки ВМД, благодаря чему достигается мелкозернистая однородная структура с твердостью металла шва и прочностью, такими же, как у основного металла.

Автоматическую сварку стыковых продольных и кольцевых швов листового металла толщиной 2–2,5 мм рекомендуется выполнять на медных подкладках со сферической формирующей канавкой глубиной 1–1,5 мм и шириной до 3 мм на параметрах режима: $d_{wэ} = 2$ мм, $d_{прис} = 2$ мм, $I_{св} = 120–160$ А, $V_{пэ} = 40–60$ м/ч, $U_d = 18–22$ В, $V_{св} = 12–20$ м/ч, $Q_{Ar} = 16–20$ л/мин.

После сварки следует провести отжиг при $T = 250$ °С в течение 2 ч для снятия остаточных напряжений. Надежная защита плавильного пространства обеспечивается на расстоянии 10–15 мм от сопла до поверхности изделия и 5–10 мм от токо-

ведущего мундштука до среза сопла. Ось электрода расположена под прямым углом к изделию при сварке стыковых соединений без разделки или с неглубокой разделкой. При большей глубине разделки сварку ведут углом $7-15^\circ$ к вертикали вперед.

2.5. Электрическая контактная сварка (точечная и шовная)

Такая сварка применяется для соединения деталей толщиной 0,3–7 мм. Поскольку электротеплофизические характеристики алюминиевых и магниевых сплавов близки, то параметры режимов сварки их отличаются незначительно. Очищенные поверхности деталей можно сохранять до сварки в сухом помещении лишь несколько часов. Недопустимо наличие остатков меди на поверхности после сварки, так как это может привести к потере коррозионной стойкости. Параметры режима точечной сварки магниевых сплавов приведены в табл. 17 и 32.

Шовную сварку можно выполнять на указанных параметрах при условии увеличения сварочного тока и усилия сжатия на 5–10 %, а длину нахлестки принимать по табл. 1.25. Прочность сварных точек на отрыв составляет 25 % этого показателя прочности на срез. Проволоки из магниевых сплавов можно сваривать стыковым ударно-искровым способом на режимах, приведенных в табл. 1.36.

2.6. Ремонтные работы

Устранение дефектов литья усложняется склонностью литейных сплавов к трещинообразованию вследствие превышения скорости деформации металла в процессе кристаллизации по сравнению с его деформационной способностью. Особенно трудно проводить ремонтные работы на фасонных литых деталях с разной толщиной стенки на соседних участках. В этом случае сварку надо вести не только с предварительным, но и с сопутствующим подогревом всей детали.

Выбор этого параметра, как и присадочного металла, определяется составом сплава. Так, при ремонтной сварке сплава системы Mg-Nb-Zr-In марки МЛ9 применяются прутки из плоской отливки того же состава сечением $7-10 \text{ мм}^2$, температура предварительного подогрева составляет 300°C , а процесс ведется на параметрах режима: $d_{\text{Wз}} = 4 \text{ мм}$, $I_{\text{св}} = 160-200 \text{ А}$.

При заварке дефектов литья сплавов системы Mg-Zn-Zr марок МЛ8, МЛ22 применяют прутки марок Св122 и Св22, модифицированных лантаном и церием, а предварительный подогрев осуществляется при температуре $400-440^\circ\text{C}$. Параметры режима сварки выбираются в зависимости от толщины стенки. При толщине стенки до 20 мм : $d_{\text{Wз}} = 4 \text{ мм}$, $d_{\text{прис}} = 3-5 \text{ мм}$, $I_{\text{св}} = 160-220 \text{ А}$, $Q_{\text{Ag}} = 8-10 \text{ л/мин}$; при толщине стенки более 20 мм : $d_{\text{Wз}} = 4 \text{ мм}$, $d_{\text{прис}} = 5-8 \text{ мм}$, $I_{\text{св}} = 240-280 \text{ А}$, $Q_{\text{Ag}} = 10-12 \text{ л/мин}$. Для снятия остаточных напряжений выполняется отжиг при $T = 300-350^\circ\text{C}$ в течение $1,5 \text{ ч}$.

Для заварки дефектов особенно эффективна сварка трехфазной дугой. Например, на изделиях из сплава МЛ5 достигнуто снижение скорости охлаждения с 15 до 3°C/с в области температурного интервала хрупкости, вследствие чего вероятность образования трещин снижается почти в 5 раз.

При использовании медной подкладки с выемкой напряжения в 2 раза меньше, чем при гладкой подкладке, когда осуществляется сквозное проплавление трехфазной дугой.

Для заварки поверхностных дефектов литья из магниевого сплава МЛ10, который очень плохо сваривается, разработан присадочный материал с $0,06-0,07\% \text{ Sc}$, значительно улучшающий свариваемость и обеспечивающий повышенные механические характеристики.

В качестве присадки используют полоски размером $8 \times 8 \times 200 \text{ см}$, получаемые при разрезании отливой пластины заданного состава.

ГЛАВА 3 ТИТАН И ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ

3.1. Маркировка и свариваемость титана и титановых сплавов

Титан и титановые сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью во многих агрессивных средах, сохраняют высокие прочностные характеристики до 500–600 °С, хорошо обрабатываются всеми видами обработки металлов давлением, имеют низкую удельную массу, благодаря чему применяются в авиастроении, ракетной технике, химическом машиностроении и других отраслях; используются как в деформированном состоянии, так и в литом.

В соответствии с ГОСТ 19807–91 маркировка титана и его деформируемых сплавов осуществляется следующим образом: ВТ00 (0,08 % Si; 0,15 % Fe; остаток Ti), ВТ1–0 (0,10 % Si; 0,25 % Fe; остаток Ti), ОТ4–1 (1,5–2,5 % Al; 0,30 % Zn; 0,7–2,0 % Mn; 0,12 % Si; 0,30 % Fe; остаток Ti), ВТ5 (4,5–6,2 % Al; 1,2 % V; 0,8 % Mo; 0,30 % Zr; 0,12 % Si; 0,30 % Fe; остаток Ti), ВТ20 (5,5–7,0 % Al; 0,8–2,5 % V; 0,5–2,0 % Mo; 1,5–2,5 % Zr; 0,15 % Si; 0,25 % Fe; остаток Ti).

В зависимости от химического состава по своему структурному строению титановые сплавы делятся на α -сплавы (ВТ1–0, ВТ5), псевдо- α -сплавы (ОТ4–1, ВТ20); (α + β)-сплавы (ВТ6, ВТ-22), псевдо- β -сплавы (ВТ30, ТС-6), β -сплавы (4201). Первые две группы сплавов имеют высокие и средние показатели пластичности и в основном свариваются хорошо, остальные отличаются высокими прочностными свойствами и пониженной пластичностью и свариваются значительно хуже.

Основные трудности, связанные со свариваемостью титана и его сплавов, обусловлены его высокой химической активностью, особенно в расплавленном состоянии, к газам — кислороду, азоту и водороду. Даже при комнатной температуре

происходит насыщение титана кислородом и азотом с образованием химических соединений (так называемый альфированный слой), что способствует падению пластичности. Поэтому в техническом титане ВТ1–0 концентрация этих элементов ограничивается: 0,12 % O_2 , 0,04 % N_2 , 0,01 % H_2 . Вредной примесью считается и углерод, содержание которого не должно превышать 0,07 %.

Поэтому обязательным условием получения качественного сварного соединения титана при сварке плавлением является надежная защита не только плавильного пространства, но и околошовной зоны, остывающего сварного шва и его обратной стороны — корня. Такую защиту могут обеспечить только инертные газы высокой степени очистки или бескислородные фторидно-хлоридные флюсы.

Например, процесс сварки объемной конструкции, содержащей несколько деталей разной формы, осуществляется в камере с контролируемой атмосферой, где обеспечиваются наилучшие условия защиты. Наличие цветов побежалости на сварном шве и околошовной зоне свидетельствует о плохой защите и выступает браковочным признаком. Повышенная твердость таких поверхностей по сравнению с твердостью основного металла является объективным критерием плохого качества.

Пористость сварных швов обычно связывается с наличием водорода, поэтому его содержание в присадочной проволоке не должно превышать 0,002–0,004 %, что достигается диффузионным отжигом проволоки при температуре 800 °С в глубоком вакууме. Сварочные проволоки в соответствии с ГОСТ 27265–87 поставляются в дегазованном и протравленном состоянии. Эффективным способом борьбы с пористостью может быть сварка с гарантированным зазором и использованием присадочной проволоки с предварительно оплавленной поверхностью. Последнее осуществляется вольфрамовым электродом на токе 20–40 А на скорости сварки 20–25 см/мин при защите в аргоне на воздухе или в камере с контролируемой атмосферой. Общие рекомендации по предупреждению пористости сварных швов на титане и его сплавах приведены в табл. 33.

Титановые сплавы обладают достаточно высокой стойкостью к образованию горячих трещин, только сплав ВТ6, леги-

рованный алюминием и ванадием, склонен к их образованию. Трещины носят межкристаллитный характер, однако склонны к самозалечиванию в процессе развития, что снижает степень их опасности при эксплуатации.

Причиной *холодных трещин* в сварном соединении является снижение пластичности его отдельных участков вследствие повышенной концентрации газов, примесей внедрения. Трещины этого типа могут возникать как непосредственно после сварки, так и через некоторое время (процесс задержанного разрушения). Основная причина данного явления — выделение водорода из твердого раствора с образованием гидридов титана, что приводит к созданию в шве больших внутренних напряжений, которые складываются с растягивающими остаточными напряжениями, а также с напряжениями от внешнего нагружения.

При сварке сплавов титана, чувствительных к термическому циклу (двухфазные ($\alpha+\beta$)-сплавы, псевдо- β -сплавы), возможен распад β -фазы с образованием хрупких типа ω -фаз в процессе охлаждения или после упрочняющей термической обработки (закалки с последующим старением). Вследствие низкой теплопроводности могут произойти срастание и огрубление зерен, особенно при нагреве выше 900 °С. Поэтому сварку плавлением α - и псевдо- α -сплавов выполняют при минимально возможной погонной энергии, а контактную — с кратковременными нагревами. При сварке двухфазных ($\alpha+\beta$)-сплавов погонную энергию увеличивают; такие «мягкие» режимы обеспечивают повышенную пластичность околошовной зоны.

На *стадии подготовки кромок под сварку* обеспечивается высокое качество сварных соединений. Основная предварительная подготовка поверхности деталей под сварку предусматривает механическую очистку торцов свариваемых кромок непосредственно перед сваркой до исчезновения следов предыдущей механической обработки, а также нанесение галогенных флюсов реагентов. Дополнительными мерами могут быть сварка деталей с фиксированным зазором, увеличение времени существования сварочной ванны, электромагнитные и ультразвуковые методы интенсификации дегазации сварочной ванны, увеличение диаметра электрода и т.п. Пористость в

сварных швах заготовок, раскroенных фрезерованием, на порядок ниже, чем при резке на гильотинных ножницах, на два порядка — при плазменной резке, а при газолазерной резке пористость вообще исключается.

После газовой резки требуется дополнительная механическая обработка кромок на глубину 1–2 мм; такой же операции требуют кромки деталей, длительное время сохранявшихся до сварки, для удаления альфированного слоя, толщина которого может составлять несколько десятых миллиметра. Заготовки, подвергавшиеся перед сваркой горячей обработке (вальцовка, штамповка, ковка и т.п.) или в термических печах без защитной атмосферы, проходят пескоструйную или дробеструйную обработку с дальнейшей химической очисткой в такой последовательности: 1) травление в растворе 150–250 г/л нитрита натрия, 500–700 г/л углекислого натрия в течение 2 ч; 2) травление в растворе 220–300 г/л плавиковой кислоты (удельный вес 1,13), 480–550 мл/л азотной кислоты (удельный вес 1,4) при температуре меньше 25 °С в течение 1–20 ч; 3) осветление в растворе 600–750 мл/л азотной кислоты (удельный вес 1,4), 85–100 мл/л плавиковой кислоты (удельный вес 1,13) в течение 3–10 мин.

Непосредственно перед сваркой кромки на ширине 15–20 мм от стыка зачищаются металлической щеткой или шабером и обезжириваются ацетоном. Удаление конденсированной влаги более эффективно путем прогревания деталей при температуре до 200 °С.

В помещениях, где сваривают титан, температура воздуха не должна быть ниже 15 °С, а скорость его движения не должна превышать 0,5 м/с.

Защита зоны сварки осуществляется аргоном и гелием в соответствии с табл. 1.7. В зависимости от размеров и конфигурации свариваемых узлов защита может быть:

- ◇ струйная за счет непрерывного обдува сварочной ванны, околошовной зоны, остывающего сварного шва и его обратной стороны — сварка листовых полотнищ, труб, приварка фланцев к трубам и т.п.;
- ◇ с использованием местных камер — сварка трубчатых конструкций, кольцевых поворотных и неповоротных стыков на монтаже;

- ◇ с общей защитой в камерах с контролируемой атмосферой — сварка изделий ответственного назначения, сложной конфигурации, швы в труднодоступных положениях и т.д.

В крупногабаритных обитаемых камерах, обеспечивающих условия работы сварщиков при изготовлении конструкций больших размеров, используется система газоочистки, так что всегда сохраняется инертная среда заданной чистоты, а сварка может выполняться как вручную, так и автоматически. Заполнение камер инертным газом может осуществляться после предварительного вакуумирования до 10^{-3} мм рт. ст., после чего внутри камеры поддерживается избыточное давление 0,01–0,03 МПа, или вытеснением из нее воздуха инертным газом — аргоном, подаваемым снизу камеры за счет его большего удельного веса.

3.2. Сварка вольфрамовым электродом

Сварка вольфрамовым электродом выполняется на постоянном токе прямой полярности на воздухе. Ручной и механизированный виды сварки получили наибольшее распространение, для чего разработаны специальные горелки, насадки, подкладки, местные камеры и т.п.

Горелки имеют сопла увеличенного диаметра, внутри которого размещены «газовые линзы», обеспечивающие ламинарное истечение защитного газа (рис. 3.1) и представляющие собой вкладыши из пористого материала или пакет из сеток с мелкими ячейками ($80\text{--}250$ отв./см²); последние быстро сгорают при сварке. Сопло выполнено в виде конуса с телесным углом $15\text{--}25^\circ\text{C}$. Конус заканчивается цилиндрической частью, длина которой не меньше диаметра (обычно 30 мм).

При сварке на токах до 150 А применяют горелки с воздушным охлаждением, при больших токах — с водяным.

Защита остывающего сварного шва осуществляется специальными хвостовыми насадками, закрепленными на горелке (рис. 3.2); их размеры подбираются опытным путем. Защита корня шва и прилегающих разогретых участков основного металла осуществляется за счет плотного поджатия кромок к мед-

Перспективно использование алюминиевого теплоотводящего покрытия, которое перед сваркой напыляется на поверхность металла с обеих сторон кромок слоем толщиной 1–1,5 мм. Оно существенно увеличивает скорость охлаждения, снижает перегрев шва и сокращает зону термического влияния, а также защищает корень шва от воздуха, что позволяет отказаться от поддува в него аргона. Последний подается в горелку за несколько секунд до сварки и после сварки, пока металл шва не остынет до 400 °С. За один проход можно сваривать стыковые соединения толщиной до 3 мм. Большие толщины сваривают многопроходными швами с соответствующей разделкой кромок (рис. 3.4). Сварка выполняется на постоянном токе прямой полярности вольфрамовыми электродами в соответствии с табл. 1.6. Рабочая часть электрода затачивается на конус с углом 30–45°, который имеет притупление до диаметра 0,5–0,8 мм. Это способствует расфокусированию дуги и более плавному переходу от основного металла к усилению шва.

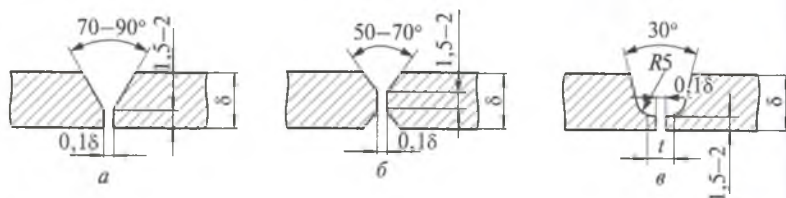


Рис. 3.4. Виды разделки кромок при сварке стыковых швов разных толщин металла:

а — 4–10 мм; б — 10–15 мм; в — больше 15 мм

Сварочные проволоки из титана и его сплавов изготавливаются в соответствии с ГОСТ 27265–87; при их выборе нужно ориентироваться на получение швов высокой пластичности, равнопрочных основному металлу, на предупреждение образования холодных трещин. Это достигается при использовании проволок с пониженной концентрацией легирующих элементов, например проволоки марки ВТ1–00св, которая рекомендуется для сварки сплавов систем легирования Ti_6Al_4V , $Ti_5Al_{2.5}Sn$, $Ti_3Al_{2.5}V$. Сварку легированных сплавов титана ведут с применением присадочных проволок более узкого назначения: ВТ6св для сплавов ВТ6, ВТ23; 2В для сплавов ПТ-3В, АТ3, АТ6; ПТ7Мсв для сплава ПТ7М; ВТ20св для сплава ВТ20;

СП15св — проволока системы комплексного легирования Ti—Al—Mo—V—Nb—Zr—Re, которая считается универсальной для сварки сплавов ВТ6, ВТ6С, ВТ-14, ВТ-22, ВТ-23; эта проволока рекомендуется для сварки двухфазных титановых сплавов с последующей упрочняющей термической обработкой; СП17 — проволока комплексной системы легирования Ti—Al—Nb—Fe—Zr для сварки сплавов ВТ4-0, ОТ4-1, АТ3, АТ6.

Иногда остаточные напряжения в соединениях из титановых α -сплавов, сваренных присадочной проволокой из $(\alpha+\beta)$ -сплавов, меньше, чем при использовании присадочных проволок из α -сплавов. Растягивающие остаточные напряжения можно снизить при местной термической обработке токами высокой частоты с одновременным созданием термических напряжений сжатия на кромках.

Параметры режима ручной аргонодуговой сварки титана и его сплавов неплавящимся электродом приведены в табл. 34.

Сварку ведут без поперечных колебаний горелки, углом вперед, короткой дугой. Аргон подается несколько секунд перед зажиганием дуги и после окончания процесса до охлаждения металла до 400 °С. Производительность сварки можно значительно повысить, применяя вольфрамовый электрод с тороидальной формой заточки торца за счет эффекта самофокусирования и электромагнитного сжатия плазмы дуги. Так, при наличии источника питания, обеспечивающего получение сварочного тока до 2000 А, можно сварить за один проход металл толщиной 40—60 мм или 110—120 мм при двухсторонней сварке.

Сварку по щелевому зазору без разделки кромок выполняют следующим образом: 1) к торцам кромок приваривают входные и выходные планки толщиной 3—4 мм; 2) в средней части на кромки наплавляют валики в три слоя с плавным переходом от валиков к листам; 3) собирают детали с зазором 2—3 мм между наплавленными валиками, а общий зазор в щели составляет 15—16 мм; 4) выполняют соединительные швы на токе 160—180 А; 5) выполняют первый проход с присадочной проволокой диаметром 3—4 мм; 6) выполняют второй проход с обратной стороны без присадки; 7) наносят другие валики на токе 380—400 А с присадочной проволокой диаметром 5 мм;

Если ввести в атмосферу дуги галогенные флюсы, которые содержат фториды кальция, магния, лития и т.п. и наносятся на свариваемые поверхности, можно значительно повысить проплавляющую способность дуги, что позволяет сваривать без разделки кромок за один проход металл толщиной до 12 мм. При этом на 15–25 % уменьшается коробление изделия, сужается зона термического влияния и улучшается структура шва, что особенно важно при сварке термически упрочняемых титановых сплавов. Флюс наносят в виде пасты слоем толщиной 0,1 мм при токе меньше 150 А и 0,2–0,3 мм при токе больше 150 А; ширина слоя составляет соответственно 15–20 мм и 40 мм. Параметры режима сварки приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4. Ориентировочные параметры режима автоматической сварки неплавящимся электродом стыковых соединений титана и его сплавов по флюсу АНТ-23а

Толщина металла, мм	$I_{св}$, А	U_d , В	$V_{св}$, м/ч	Q_{Ag} , л/мин		
				в горелку	в насадку	на поддув
0,8	18–35	7–8	11–25	2–3	2–3	1–2
1,0	20–40	7–8	11–25	2–3	2–3	1–2
1,5	40–60	7–8	10–20	2–3	2–3	1–2
2,5	80–100	8–9	10–20	3–4	3–4	1–2

При сварке металла толщиной более 3–4 мм компоненты флюса можно вводить в плавильное пространство в виде наполнителя присадочной порошковой проволоки с оболочкой из титана. При этом сохраняются все преимущества сварки по флюсу и появляется возможность однопроходной сварки титановых сплавов толщиной до 15 мм. После сварки на поверхности шва остается слой затвердевшего шлака, дополнительно защищающий остывающий металл. Такая технология рекомендуется для сварки тавровых соединений, электрозаклепок, замкнутых кольцевых швов «на весу» и т.п. В последнем случае значительно улучшается не только проплавляющая способность сварочной дуги, но и качество сварного соединения (уменьшается степень химической неоднородности, снижается пористость).

3.3. Плазменная сварка

Используя плазменную сварку, можно сваривать без разделки кромок детали толщиной более 10 мм (табл. 3.5), а применение микроплазменной сварки с наложением импульсов, наоборот, позволяет сваривать металл сверхтонких толщин 0,08–0,2 мм (табл. 36). В последнем случае необходим строгий контроль параметров режима сварки, определяющих проплавливающую способность микроплазменной струи.

Таблица 3.5. Ориентировочные параметры режима плазменной сварки титана

Толщина металла, мм	$I_{\text{св}}$, А	$U_{\text{д}}$, В	$V_{\text{св}}$, м/ч	$Q_{\text{Аг}}$, л/мин		
				плазмообразующего	защитного	на поддув
2	120–140	22–23	30–40	2–2,2	1,5–2,0	3,5–4,0
6	240–250	22–23	14	5–6	9–10	—
10	370–390	27–28	15	3–4	10–11	4–5
12–15	440–460	28–30	10–16	6–10	6–12	—

Сварка плавящимся электродом выполняется на постоянном токе обратной полярности и рекомендуется для соединения деталей толщиной более 4 мм. Формирование и размеры сварных швов зависят от рода защитного газа: в гелии швы имеют более плавный переход усиления к основному металлу, в аргоне проплавление более глубокое и узкое. Сварку рекомендуется вести присадочной проволокой марки ВТ1–00 на параметрах режима, приведенных в табл. 3.6.

Таблица 3.6. Ориентировочные параметры режима механизированной сварки стыковых соединений титана без разделки кромок плавящимся электродом в среде инертных газов

Толщина металла, мм	d_3 , мм	$I_{\text{св}}$, А	$U_{\text{д}}$, В	$V_{\text{св}}$, м/ч	Вылет, мм	$Q_{\text{Аг}}$, л/мин
3–8	1,6	350–450	28–36/22–28	25–40	20–25	30–40/20–30
10–12	1,6–2	440–520	38–40/30–34	20–35	20–28	70–90/35–45

Окончание табл. 3.6

Толщина метал-ла, мм	d_3 , мм	$I_{св}$, А	U_d , В	$V_{св}$, м/ч	Вылет, мм	Q_{Ar} , л/мин
15	3	600–650	42–48/30–32	25–30	25–30	70–100/35–50

Примечание. В числителе — при сварке в гелии, в знаменателе — в аргоне.

Положительный эффект достигается при использовании импульсно-дуговой сварки на параметрах режима, данных в табл. 3.7.

Таблица 3.7. Параметры режима сварки титанового сплава ПТЗВ толщиной 5–10 мм в среде аргона «на весу» за один проход

Способ сварки	Присадочная проволока		$I_{св}$, А	$V_{пз}$, м/ч	$V_{св}$, м/ч
	Марка	d_3 , мм			
Импульсно-дуговая ¹	BT1–00С	2,0	520–540	35–40	8
	СП2Всв	1,6	550–570	40–50	8
Плазменно-дуговая ²	BT1–00С	2,0	295–300	65–70	12
	СП2Всв	1,6	295–300	65–70	12

¹ Ток дежурной дуги 30 А, продолжительность импульса и паузы соответственно 0,2 и 0,1 с.

² Расход плазмообразующего газа 5 л/мин.

В монтажных условиях рекомендуется использовать импульсно-дуговой процесс в гелии (табл. 3.8). При этом сварку следует вести в палатке для предотвращения сдувания защитной струи от плавильного пространства или необходимо применять камеры с контролируемой атмосферой.

Таблица 3.8. Ориентировочные параметры режима механизированной импульсно-дуговой сварки тавровых соединений из титановых сплавов плавящимся электродом диаметром 1,2 мм

Толщина металла, мм	Подготовка кромок	Катет шва, мм	$I_{св}$, А	U_d , В	$V_{св}$, м/ч
4–9	С разделкой и полным проваром корня шва	4–7	60–70	27–32	35–40
10–16			90–100	30–32	20–30
18–46			90–100	30–32	20–30

Окончание табл. 3.7

Толщина металла, мм	Подготовка кромок	Катет шва, мм	$I_{св}, A$	U_d, B	$V_{св}, м/ч$
3	Без разделки с неполным проваром корня шва	3—4	60—80	27—32	30—35
4—8		5—6	60—80	27—32	30—35
9—10		6—7	60—80	27—32	30—35

Примечание. Ток дежурной дуги 40—45 А; расход гелия 15—18 л/мин.

3.4. Сварка под флюсом

Сварка под флюсом ведется на постоянном токе обратной полярности и применяется для изготовления титановых изделий с толщиной стенки от 3—4 до 30—40 мм, для чего используются флюсы системы CaF_2-BaCl_2-NaF , основным компонентом которых является CaF_2 (до 95 %).

Высота слоя флюса должна быть не менее вылета электрода, который для электрода диаметром 3—4 мм составляет 17—19 мм и 20—22 мм для электрода диаметром 5 мм. В качестве присадки используется проволока марки ВТ1—00. При сварке конструкций особо ответственного назначения применяется комбинированная флюсогазовая защита (рис. 3.5): благодаря специальному устройству бункера флюс продувается аргоном, что исключает попадание воздуха в сварочную ванну. Подача аргона с расходом 3—4 л/мин в бункер начинается за 0,5—1 мин до подачи флюса в плавильное пространство, а заканчивается одновременно с окончанием сварки.

Металл толщиной до 10—12 мм сваривают односторонними швами без разделки кромок, до 20—25 мм — двухсторонней сваркой с Х-подобной разделкой с углом 90° и притуплением 3—5 мм на параметрах режима, приведенных в табл. 3.9.

Вследствие большого электрического сопротивления титана сварку ведут на малых вылетах электрода в зависимости от его диаметра:

$d_э, мм$	2,0—2,5	3—4	5
$l_э, мм$	14—16	17—19	20—22

Таблица 3.9. Ориентировочные параметры режима автоматической сварки под флюсом стыковых швов на титане

Способ сварки	Толщина металла, мм	d_3 , мм	$I_{св}$, А	U_d , В	$V_{св}$, м/ч
На остающейся подкладке	3–4	2,5	240–290	30–32	45–55
На медной подкладке	4–6	3	340–420	32–34	45–50
То же	8	4	590–600	30–32	40–50
Двухсторонняя	10–12	3	440–500	32–34	45–50
То же	16–20	4	590–610	30–34	40–45

При сварке толстолистового металла эффективно ведение процесса двумя смещенными электродами как в направлении сварки, так и поперек сварного шва (рис. 3.6), что позволяет получать сварной шов с большим коэффициентом заполнения разделки кромок, плавным переходом от основного металла к усилению шва и хорошим качеством.

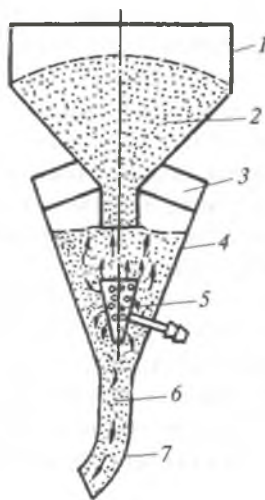


Рис. 3.5. Схема бункера для газофлюсовой защиты сварочной ванны:
 1 — приемный бункер; 2 — флюс; 3 — ограничительные кронштейны;
 4 — бункер газовой активации; 5 — газовый активатор; 6 — флюс после продува; 7 — флюсопровод

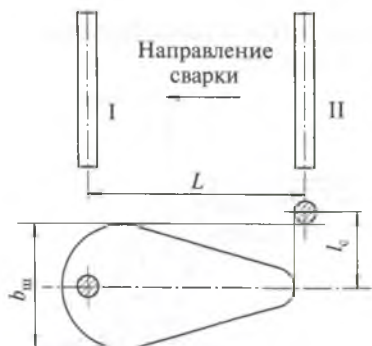


Рис. 3.6. Схема двухдуговой сварки смещенными электродами

Величина l_c определяется по эмпирической формуле

$$l_c = (b_{\text{ш}} + d_3)/2,$$

где $b_{\text{ш}}$ — ширина шва, образованного первым электродом; d_3 — диаметр второго электрода.

3.5. Электрошлаковая сварка

Электрошлаковая сварка может выполняться всеми разновидностями этого способа с использованием флюсов марок АНТ-2, АНТ-4, АНТ-6 на той же основе, что при сварке под флюсом (табл. 37). При этом применяется дополнительная защита инертным газом плавильного пространства, разогретой поверхности шва около ползунов и титанового электрода на участке вылета.

Электрошлаковая сварка титанового сплава марки ВТ6 толщиной 110 мм выполняется с использованием плавящегося мундштука толщиной 18 мм из сплава ВТ6 и сварочной проволоки марки ВТ1-00 под флюсом АНТ-2. Проволоки подаются по двум каналам, расстояние между которыми 75 мм. Другие параметры режима: $d_3 = 4$ мм, $I_{\text{св}} = 1600-2200$ А, $U_{\text{шв}} = 20-24$ В, $V_{\text{св}} = 1,2-1,25$ м/ч, $Q_{\text{Аг}} = 25$ л/мин.

Электрошлаковый процесс наводится жидким стартом. Поскольку все фторидные шлаки отличаются высокой жидкотекучестью, зазоры между формирующими подкладками, ползунами и кромками свариваемых деталей не должны быть более 0,5 мм, что требует механической обработки.

Для электрошлаковой сварки титана разработаны специализированные установки (рис. 3.7, 3.8).

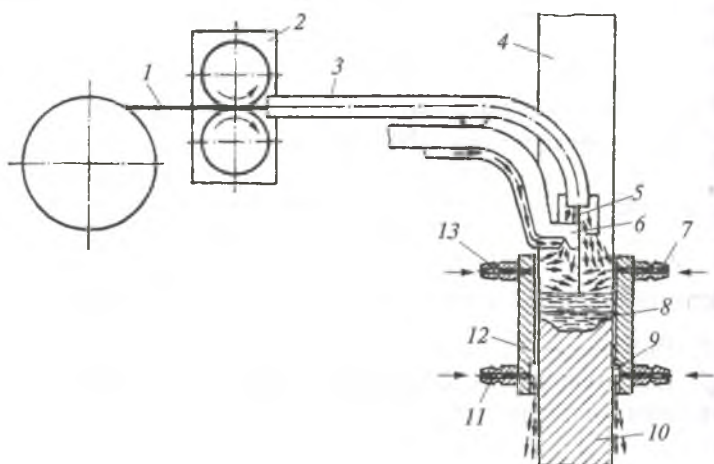


Рис. 3.7. Схема приспособления типа А-1022 для электрошлаковой сварки изделий из титановых сплавов проволочными электродами:

1, 5 — проволочный электрод; 2 — подающий механизм; 3 — мундштук; 4 — свариваемая деталь; 6 — медная токоподводящая вилка; 7, 11, 13 — штуцеры; 8 — металлическая ванна; 9 — газовый коллектор; 10 — затвердевший сварной шов; 12 — формирующий медный ползун

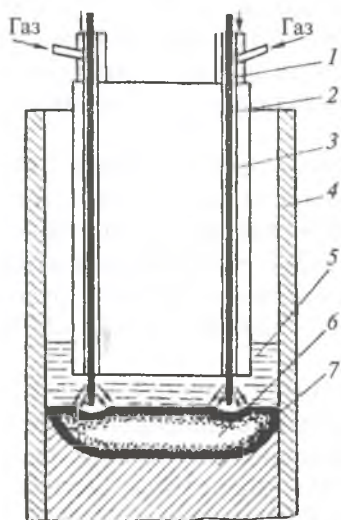


Рис. 3.8. Схема электрошлаковой сварки плавящимся мундштуком с барботированием сварочной ванны аргоном:

1 — газовая камера; 2 — электрод; 3 — плавящийся мундштук; 4 — формирующая планка; 5 — шлаковая ванна; 6 — металлическая ванна; 7 — сварной шов

При использовании установки на рис. 3.8 глубина проникновения аргона в металлическую ванну может достигать 14 мм, благодаря чему она очищается от неметаллических включений при одновременном интенсивном удалении водорода из жидкого титана.

3.6. Электронно-лучевая сварка

Электронно-лучевая сварка используется при изготовлении конструкций из высоколегированных титановых сплавов, в том числе из термически упрочняемых двухфазных сплавов. Свойства сварного соединения в значительной мере зависят от качества подготовленных под сварку кромок. Подготовка ведется в следующем порядке: 1) кромки обезжиривают 10 мин в щелочном растворе при температуре 70 °С; 2) травят в растворе: 2 %(об.) HF концентрации 3 %, 20 %(об.) HNO₃ концентрации 35 %, остальное — вода; 3) 0,5 мин промывают водой при комнатной температуре. Подготовленные таким образом детали должны быть сварены в течение 10 ч; непосредственно перед сваркой кромки дополнительно промывают ацетоном.

Сварка осуществляется в основном без присадки, стыковые соединения выполняются без разделки кромок, но при этом требуется очень точная сборка под сварку с минимальными зазорами.

Толщина металла, мм	10	20	30	40	50	60
Зазор, мм	0,11	0,16	0,18	0,22	0,24	0,26

Иногда свариваемые стыки готовят с технологическими утолщениями. Так, для листов толщиной 20 мм верхнее и нижнее утолщения составляют соответственно 3 и 2 мм, а для листов толщиной 40 мм — 4 и 3 мм; после сварки утолщения сострагивают. Соблюдение параметров режима и технических приемов при сварке обеспечивают необходимое формирование сварного шва, отсутствие дефектов и удовлетворительные показатели физико-химических свойств (табл. 38).

Техника сварки предусматривает использование различных приспособлений — прижимов, фиксаторов и т.п., изготов-

ленных из алюминия, чтобы избежать отклоняющего действия магнитных полей на луч в процессе сварки.

Типичным дефектом этого способа сварки является образование микровздутий с рельефом горячих трещин, что обусловлено нарушением гидродинамических условий переноса металла в корневой части сварочной ванны, а также повышенным содержанием кислорода и углерода.

Для устранения других возможных дефектов, например подрезов, рекомендуются сварка в два прохода с разглаживанием шва во втором проходе, а также ведение процесса с продольным колебанием луча.

При сварке титанового сплава ВТ20 сквозным проплавлением для борьбы с пористостью и корневыми дефектами рекомендуется применять теплоотводящие формирующие подкладки и одновременно наносить на свариваемые поверхности слой активирующего флюса АНТ23а. Процесс сварки ведется с продольными колебаниями расфокусированного луча, что обеспечивает квазиимпульсный режим за счет подачи на электромагнитную катушку управляющего сигнала пилообразной формы. Благодаря такой технике сварки исключаются образование подрезов и разбрызгивание металла с лицевой и корневой частей шва.

Чтобы устранить пустоты, следует увеличивать плотность энергии луча при движении в направлении сварки, а при обратном движении — ее снижать. Частота колебаний подбирается таким образом, чтобы средняя скорость движения луча относительно свариваемых деталей была на порядок выше скорости теплоотвода от пятна нагрева и скорости перемещения детали относительно электронно-лучевой пушки.

Для предупреждения пористости нужно тщательно подготавливать поверхности под сварку и обеспечивать условия для максимальной дегазации сварочной ванны. При сварке в нижнем положении «на весу» со скоростью 10–30 м/ч вдоль корня шва появляются провисающие вдоль шва капли металла, вследствие чего в верхней части шва образуются понижения. Поэтому сварку ведут на подкладке, толщина которой может составлять 50 % толщины свариваемой детали. После окончания процесса подкладка удаляется вместе с дефектами механическим путем. При такой технике сварки верхняя часть шва имеет грибовидную расширенную форму вследствие выноса

перегретого металла из корневой части ванны в хвостовую; при этом увеличиваются угловые деформации. Этот недостаток устраняется при сварке горизонтальным лучом со сквозным проплавлением; при этом обеспечивается качественное формирование шва с параллельными границами на металле толщиной больше 100—150 мм. Получение в вершине и корне шва усиления с плавным переходом к основному металлу достигается на режиме сварки, при котором мощность луча на 15—20 % больше необходимой для сквозного проплавления стыка.

Наиболее эффективна электронно-лучевая сварка проникающим лучом при изготовлении металлоконструкций из титановых сплавов средних и больших толщин. Характерными дефектами при этом являются чередующиеся или одиночные открытые или закрытые раковины и свищи в корневой части шва, круглые одиночные и групповые поры, ослабления швов.

Бездефектная сварка может быть обеспечена горизонтальным лучом с различной формой развертки на параметрах режима, приведенных в табл. 3.10. Такая техника позволяет вести процесс сварки деталей с переменным зазором в стыке 0—2 мм и смещением свариваемых кромок до 15 мм.

Таблица 3.10. Ориентировочные параметры режима электронно-лучевой сварки титановых сплавов с полным проплавлением при $U_{\text{сск}} = 60$ кВ и частоте развертки 1010 Гц

Марка сплава	Толщина металла, мм	$I_{\text{п}}, \text{мА}$	$L_{\text{р}}, \text{мм}$	$\Delta L_{\Phi} = \Delta L_{\text{р}} - L_{\Phi}, \text{мм}$	$V_{\text{св}}, \text{м/ч}$	Развертка пучка	
						Тип	Ширина по лицевой поверхности, мм
5BA	14	140	350	−25	18	П	1,8
ПТ-3В	30	230	300	−30	17	П	2,0
5BA	46	280	340	−30	17	П	1,5
ПТ-3В	60	390	300	−30	18	П	1,8
5BA	70	440	310	−40	17	О	1,5
ПТ-3В	100	700	460	−55	17	П	1,9
5BA	160	900	390	−95	13,5	П	1,0

Примечание: $L_{\text{р}}$ — расстояние от центра фокусирующей линзы к лицевой поверхности изделия; L_{Φ} — фокусное расстояние; П — поперечная синусоидальная развертка; О — развертка по кругу.

Сварку однородных и разнородных по составу титановых сплавов можно производить при различной ориентации луча и сварного шва (табл. 3.11). В первой схеме сварной шов и луч находятся в горизонтальном положении, во второй — шов сваривается в вертикальном положении, а луч находится в горизонтальном положении. При этом зазор составляет 0—0,5 мм, а смещение кромок не превышает 5 мм. Остальные параметры режима следующие: ускоряющее напряжение 60 кВ, частота вращения пучка 400 Гц, расстояние от пушки до изделия 175 мм, диаметр пучка луча 5 мм. Сварка по обеим схемам обеспечивает получение удовлетворительных по своим размерам сварных швов.

Таблица 3.11. Ориентировочные параметры режима электронно-лучевой сварки титановых сплавов

Марка сплава	Толщина металла, мм	Номер схемы сварки	$I_{\text{п}}$, мА	$V_{\text{св}}$, м/ч	Размеры внешнего и обратного валиков, мм	
					$B \times H$	$b \times h$
OT4-1	80	1	320	12	6,5 × 4,0	4,0 × 1,0
BT3-1			340	12	7,0 × 2,0	5,0 × 2,0
OT4-1+B T3-1			355	12	7,0 × 3,0	5,5 × 3,5
OT4-1	100	1	475	10	7,6 × 3,5	3,5 × 1,5
BT3-1			480	10	8,5 × 2,2	5,0 × 3,5
OT4-1+B T3-1			590	10	7,8 × 3,0	5,0 × 3,5
OT4-1	80	2	340	12	6,4 × 2,8	4,8 × 1,5
BT3-1			365	12	7,2 × 2,1	5,0 × 2,2
OT4-1+B T3-1			380	12	7,5 × 3,0	5,0 × 2,3

Примечание: B и b — ширина внешнего и обратного валиков; H и h — высоты выпуклости (усиления) соответственно внешнего и обратного валика.

Среди конструкционных титановых сплавов BT6 наиболее распространен (70 % среди всех остальных). Независимо от способа его получения (вакуумно-дуговой плавкой или электронно-лучевой) он является равноценным в сварных соеди-

нениях, выполненных разными способами и на параметрах режима, приведенных в табл.3.12.

Таблица 3.12. Ориентировочные параметры режима сварки стыковых соединений сплава ВТ6

Способ сварки	Толщина металла, мм	I_{CB}, A	U_d, B	$V_{CB}, M/ч$
Аргонодуговая без разделки кромок с проволокой СП-15 диаметром 2 мм	3	180	12	12
	5	385	14	30
Аргонодуговая под слоем флюса АНТ-325А	3	135	9	12
	5	250	11	12
Аргонодуговая с разделкой кромок с проволокой ВТ6св диаметром 1,2 мм	12	110	15	15
		180	9	
		230	9	
Электронно-лучевая	5	$I_n = 38 \text{ MA}$	$U_{yck} = 60 \text{ KB}$	25
	12	$I_n = 75 \text{ MA}$	$U_{yck} = 60 \text{ KB}$	25

3.7. Электрическая контактная сварка

Контактная сварка титана и его сплавов может выполняться всеми ее разновидностями при соответствующей технологии подготовки поверхности. Перед точечной и шовной сваркой обязательной операцией является травление листов в осветляющем кислом растворе 30 % HNO_3 (70 % концентрации), 3 % HF (49 % концентрации) и 67 % воды в течение 1 мин. После этого контактное сопротивление снижается до 50–60 мкОм при максимально допустимом значении 100 мкОм.

Срок хранения деталей в специальных сушильных тарах не должен превышать 45–50 ч, а при шовной сварке этот срок еще меньше.

Контактная точечная сварка обеспечивает высокие показатели механических свойств в широком интервале параметров режима даже без защиты зоны нагрева инертными газами. Сварку на-

до вести с минимальными интервалами времени; в противном случае в области температур $\alpha \rightarrow \beta$ превращений возможно образование мелкоигольчатой структуры α' -фазы, снижающей пластические свойства соединения. Поэтому применяются жесткие режимы, иногда с повторным нагревом точки путем пропускания через нее тока $(0,7-0,9)I_{св}$. Это предупреждает образование закалочных структур и способствует снятию остаточных напряжений в сварных конструкциях, особенно изготовленных из средне- и высоколегированных титановых сплавов. Остаточные напряжения можно снизить и за счет приложения ковочного усилия в момент окончания действия импульса сварочного тока. При этом крупнокристаллическая структура литого ядра точки измельчается, приближая ее к мелкокристаллической структуре основного металла. Параметры режима точечной сварки титана приведены в табл. 3.13, 3.14.

Таблица 3.13. Ориентировочные параметры режима точечной сварки титана BT1-0

Толщина металла, мм	$R_{сф}$ электрода, мм	$I_{св}$, кА	$t_{св}$, с	$F_{св}$, даН	Диаметр точки, мм
0,3 + 0,3	20—25	4,5—5,0	0,04—0,08	75—100	2,5
0,5 + 0,5	25—40	4,5—5,0	0,08—0,10	150—200	3,0
0,8 + 0,8	50—75	5,5—6,0	0,10—0,15	200—250	4,0
1,0 + 1,0	75—100	5,8—6,2	0,15—0,20	250—300	5,0
1,2 + 1,2	75—100	6,4—6,6	0,20—0,25	300—350	5,5
1,5 + 1,5	75—100	6,8—7,2	0,25—0,30	350—400	6,0
1,7 + 1,7	75—100	7,2—7,7	0,25—0,30	400—450	6,5
2,0 + 2,0	100—150	8,8—9,5	0,30—0,35	450—500	7,0
2,5 + 2,5	100—150	9,5—10,5	0,30—0,35	600—750	8,0
3,0 + 3,0	100—150	11,5—12,5	0,35—0,40	800—900	9,0

Таблица 3.14. Ориентировочные параметры режима конденсаторной сварки титановых сплавов типа ОТ4

Толщина деталей, мм	Установочные параметры				Технологические параметры		
	C , мкФ	U_m , В	$F_{св}$, кН	d_3 , мм	I_{max} , кА	t_a , мс	$t_{св}$, мс
0,5 + 0,5	19600	190	2,0	4,0	6,6	10	36

Окончание табл. 3.14

Толщина деталей, мм	Установочные параметры				Технологические параметры		
	C , мкФ	U_m , В	$F_{св}$, кН	$d_э$, мм	I_{max} , кА	t_a , мс	$t_{св}$, мс
0,8 + 0,8	19600	200	2,5	5,0	7,5	10	38
1,0 + 1,0	29400	200	3,5	5,0	10,3	13	40
1,5 + 1,5	78400	200	5,0	7,0	18,1	24	90
2,0 + 2,0	147000	200	6,5	8,0	19,9	36	128

Примечания. 1. Сварка проводилась на сварочной машине типа МТК-75.
 2. Объяснение параметров см. в табл. 19. 3. Минимальное расстояние между точками см. в табл. 21.

При сварке легированных титановых сплавов марок ВТ6-С, ВТ-14 следует выбирать полуфабрикаты с минимальным количеством водорода (не более 0,006 %), а сварку вести на средних по жесткости режимах, в то время как для сплава ОТ4-1 при немного большем содержании водорода (0,01 %) параметры режима должны быть более жесткими (табл. 3.15).

Таблица 3.15. Ориентировочные параметры режима точечной сварки легированных титановых сплавов

Марка сплава, толщина, мм	$F_{св}$, даН	$I_{св}$, кА	$t_{и}$, с	$t_{паузы}$, с	$t_{и}$ вторичного, с	$I_{и}$ вторичного, кА
ВТ6С, ВТ14 (2 + 2)	700	9,2	0,24	—	—	—
	700	9,5	0,24	0,24	0,48	5,4
ОТ4-1 (1,5 + 1,5)	600	8,0	0,16	—	—	—

Качество сварного соединения можно улучшить, проводя электротермомеханическую обработку, применяя электрод-соленоид и обжимающую втулку или используя двухимпульсную циклограмму (табл. 3.15). Для более интенсивного теплоотвода рекомендуется использовать электроды из бронзы БрХЦр 0,3–0,09 со сферической формой поверхности с повышенным расходом охлаждающей воды — больше 5 л/мин. Чтобы предупредить диффузионное схватывание в уплотнитель-

ном пояске, применяются барьерные вещества совместно с клеями и герметиками.

Для более надежного контроля качества сварных точек методом рентгенографии рекомендуется использовать металлы-свидетели, которые размещаются между свариваемыми деталями, например в виде ленты-припоя марки СТЕЛМЕТ 1201 (Zr 12 %, Ni 12 %, Cu 24 %, Ti — остаток) толщиной 0,04–0,06 мм и шириной 20 мм. При этом в уплотнительном пояске образуется сварно-паяное соединение.

Контактная шовная сварка предполагает применение шагового перемещения деталей и включение сварочного тока в момент остановки роликов, благодаря чему создаются благоприятные условия для кристаллизации расплава под давлением за счет более быстрого охлаждения металла и большего проплавления без перегрева внешней поверхности. Скорость вращения роликов при выключении тока возрастает до максимума и снижается до нуля в момент включения тока. Для повышения долговечности роликов рекомендуется перемещать детали с малым усилием сжатия, а сваривать с большим.

Сварка ведется по отбортовке или внахлестку на жестких режимах с использованием обычного серийного оборудования с интенсивным водяным охлаждением для уменьшения износа роликов и оптимизации качества сварного соединения (табл. 39).

Шунтирование тока компенсируется за счет его увеличения на 20–30 % по сравнению с точечной сваркой.

Для снижения коробления детали собираются на прихватках по оси сварного шва точечной сваркой с шагом 50–100 мм, особенно при сварке кольцевых швов. Небольшие детали могут свариваться без прихваток, но с использованием специальных жестких сборочных приспособлений.

Шовную сварку листовых деталей встык выполняют с применением теплоизолирующей накладки с двух сторон. Толщина накладки зависит от толщины листа и при сварке металла толщиной менее 1 мм и более 1 мм составляет соответственно 50 и 30 % его толщины. Шовная сварка осуществляется за один проход, замкнутые или прерывистые швы необходимо пере-

привать 5–8 точками при увеличенном на 15–20 % токе, а места перекрытия продольных и поперечных швов дополнительно скашивать. Для уменьшения деформаций и напряжений используют обкатку шва роликами вхолостую. Выполненные сварные швы имеют худшие показатели механических свойств, чем при точечной сварке, вследствие большего времени пребывания металла при повышенных температурах. Сварное соединение разрушается по основному металлу вследствие упрочнения металла шва и зоны термического влияния при образовании мартенситоподобной α' -фазы.

Контактная стыковая сварка выполняется оплавлением как с подогревом торцов деталей, так и без подогрева, обязательно в среде инертных газов.

Подготовка деталей под сварку состоит из двух операций – механической обработки и травления в кислом растворе, причем время между травлением стыков и их сваркой должно быть по возможности очень коротким и не превышать 24–30 ч. Наличие защитной среды не сдерживает образование оксидов на поверхности оплавления, если его конечная скорость ниже оптимальной, поэтому сварка ведется короткими циклами плавления и осадки.

Параметры режима характеризуются большими в 2–3 раза токами, чем при сварке стальных деталей, и минимальным временем их протекания (табл. 40).

Сварку деталей с площадью поперечного сечения более 100 мм² выполняют с предварительным подогревом. Подогрев дает возможность уменьшить необходимую электрическую мощность, конечную скорость оплавления, припуск на оплавление, снизить удельное давление осадки и его скорость. Давление осадки выбирается с учетом рекомендаций, приведенных в табл. 1.33. По окончании осадки большая часть расплава выдавливается наружу стыка.

Во избежание образования холодных трещин при сварке высокопрочных титановых сплавов проводится отжиг сразу после сварки при температуре 700–750 °С непосредственно в сварочной машине путем пропускания через соединение тока на 10–15 % меньше сварочного.

3.8. Сварка в твердой фазе

Прессовая сварка находит ограниченное применение, так как требует предварительного подогрева до 700–900 °С, а после сварки изделия подвергаются отжигу. Детали с компактной формой поперечного сечения (прутки, стержни, трубы) можно сваривать обычным и инерционным трением; прочность сварных соединений такая же, как у основного металла.

Так, режим сварки заготовок диаметром 16 мм из сплава ОТ4 предусматривает: на первой стадии сварки при нагревании давление 60 МПа, деформация 2 мм; на второй стадии при осадке — давление 100 МПа, деформация 4 мм, время цикла сварки 5 с.

При *диффузионной сварке* в вакууме для получения соединений с малой степенью деформации, что требуется при изготовлении прецизионных изделий, детали подвергаются отжигу в вакууме при температуре, большей температуры полиморфного превращения свариваемого сплава, вследствие чего в объеме деталей образуется крупнозернистая пластинчатая структура с малыми остаточными деформациями. Непосредственно перед сваркой контактные поверхности механически обрабатывают до степени чистоты G5–G7, после чего детали свариваются при температуре ниже температуры полиморфного превращения, но выше температуры рекристаллизации при относительно большом давлении.

Так как сплавы с равноосной мелкокристаллической структурой обладают большей скоростью высокотемпературной ползучести, их можно использовать в качестве промежуточных прокладок толщиной 0,8–1,0 мм при сварке сплавов с крупнозернистой пластинчатой структурой, что позволяет повысить механические свойства сварных соединений. При сварке деталей с малой остаточной деформацией при низких давлениях оптимальным можно считать сочетание слоя с мелкозернистой равноосной структурой в приконтактной зоне и крупнозернистой пластинчатой структурой в объеме детали. Первая обеспечивает хорошие условия для создания физического контакта за счет деформации микровыступов, вторая — малые остаточные деформации.

Если предварительная подготовка свариваемых поверхностей обеспечивает низкую газонасыщенность при нагревании до их контактирования, то качество диффузионного сварного соединения значительно улучшается, так как развивается активирующий фактор деформации под действием собственных напряжений в виде высокотемпературного рельефа, что интенсифицирует процесс создания соединения.

При сварке титанового сплава ВТ23 развиваются остаточные продольные деформации, что обусловлено фазовыми превращениями при охлаждении в интервале температур 750–550 °С, а это в свою очередь приводит к появлению сварочных напряжений, так как детали находятся под давлением. Их можно снизить двумя способами термической обработки — отжигом при $T = 750$ °С в течение 1–2 ч с охлаждением на воздухе и двухступенчатым старением: 8 ч при $T = 380$ °С и 2 ч при 550 °С, или предварительным отжигом деталей перед сваркой, после чего производится только старение.

При диффузионной сварке лопаток из титанового сплава ВТ8М применяется двухступенчатый нагрев: на первой ступени он не превышает 750 °С, а на второй $T = 920$ °С. Сварка продолжается 20 мин под давлением $P = 4$ МПа, после чего изделие охлаждается под нагрузкой до $T = 100$ –150 °С. Полный цикл нагрева, сварки и охлаждения составляет соответственно 60–90 мин, 20 мин и 240–300 мин.

Диффузионная сварка титана и его сплавов выполняется в камерах при разрежении $1 \cdot 10^{-3}$ – $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. При оптимальных параметрах режима сварки происходит полное растворение оксидной пленки на соединяемых поверхностях при отсутствии перегрева металла и роста зерна (табл. 3.16).

Таблица 3.16. Ориентировочные параметры режима диффузионной сварки титана и некоторых его сплавов

Марка сплава	Температура нагрева, °С	Давление, МПа	Продолжительность сварки, мин
ВТ1–0	800	7,5	7
ВТ5–1	1000	5,0	8
ВТ15	800	4,5	21
ВТ6	900	2,0	—

На параметры режима сварки существенно влияет подготовка поверхности: полирование ее по сравнению с токарной чистовой обработкой позволяет в 2 раза уменьшить удельное давление и на 300 °С снизить температуру сварки, вследствие чего остаточная деформация деталей не превышает 2 % по сравнению с 4–6 %. При этом зону контакта невозможно обнаружить под микроскопом, а прочность и пластичность соединения такие же, как у основного металла. При сварке на параметрах режима, отвечающих условиям сверхпластичности, при использовании установок с системой деформирования с заданной скоростью можно в 6–30 раз сократить длительность процесса, снизить в 4 раза необходимое давление и уменьшить на 50–180 °С температуру нагрева (табл. 3.17).

Таблица 3.17. Ориентировочные параметры режима сварки титановых сплавов в условиях сверхпластичности

Свариваемый сплав	Температура нагрева, °С	Продолжительность нагрева, мин	Скорость деформации, с ⁻¹
ОТ4 + ОТ4	900	1,2	$2 \cdot 10^{-3}$
ВТ6 + ВТ6	900	3,2	$7,5 \cdot 10^{-4}$
ОТ4 + ВТ15	920	10	$2 \cdot 10^{-3}$

После диффузионной сварки в вакууме почти всегда предусматривается проведение термической обработки.

Способ ударной сварки в вакууме предусматривает нагрев электронным лучом со скоростью 400 °С/мин и дальнейшее приложение ударного одиночного импульса со скоростью до 30 м/с. Под действием динамического нагружения происходит пластическая деформация и образуется сварное соединение. Так сваривают звенья цепей из сплава ВТ16 на режиме: $T = 900\text{--}950$ °С; энергия удара 350 Дж. Сварку полужвеньев внахлестку выполняют в деформирующем устройстве, после чего соединение подвергают термической обработке: закалке от 820 °С и двухступенчатому старению: 9 ч при $T = 450$ °С и 4 ч при 550 °С – все в инертной атмосфере.

3.9. Ремонт изделий из титановых сплавов

Ремонтные работы проводятся с целью ликвидации дефектов, возникающих в процессе эксплуатации. Так, у лопаток компрессоров газотурбинных двигателей, изготовленных из сплава ВТ9, наиболее распространенный дефект — повреждения пера — разрушение уплотняющих поясков на периферии, мелкие трещины на выходных кромках профильной части, забои, сколы. Если перо изготовлено вместе с диском, то старое перо отрезают, а новое приваривают к диску блиска. Свариваемые детали собираются на специальном бандаже, что исключает деформацию в зоне сварки и обеспечивает получение шва постоянной толщины, а сварка выполняется электронным лучом сквозным проваром без присадки в нижнем положении на режиме: $U_{\text{уск}} = 60$ кВ, $I_{\text{п}} = 90$ мА, $I_{\text{ф}} = 980$ мА, $V_{\text{св}} = 25$ м/ч; после сварки бандаж отрезается механической обработкой.

Мелкие дефекты подвариваются аргонодуговым способом с использованием специальной малогабаритной горелки и присадочной проволоки ВТ6св, которая обеспечивает необходимую пластичность на параметрах режима, представленных в табл. 3.18.

Таблица 3.18. Ориентировочные параметры режима ремонтной наплавки лопаток из сплава ВТ9 ($d_{\text{Wз}} = 2$ мм)

Тип дефекта	$d_{\text{прис}}, \text{мм}$	$I_{\text{св}}, \text{А}$	Время, с		$Q_{\text{Аг}}, \text{л/мин}$	
			сварки	охлаждения	в горелку	на поддув
Забой входных кромок	0,8	40	80	160	4—6	2—4
Скол	0,8	50	60	180	3—6	2—4
Механическое повреждение	0,8—1,0	60	30	180	6—7	3—4
	0,8—1,0	80	30	180	7—8	4—5

4.1. Маркировка и свариваемость меди

Медь и сплавы на ее основе широко используются во многих отраслях народного хозяйства, где требуется сочетание таких важных свойств, как прочность, теплопроводность и электрическая проводимость, высокая коррозионная и эрозионная стойкость, антифрикционные свойства и т.п.

Медь используется для изготовления электрораспределительных приборов, электрических машин и аппаратов, теплообменных аппаратов, водоохлаждаемых кристаллизаторов, в криогенной технике и т.д.

В соответствии с ГОСТ 859—2001 медь маркируется в зависимости от степени чистоты: с повышением цифрового индекса металла количество примесей в ней увеличивается. Например, бескислородная медь марки М006 — это на 99,99 % ($\text{Cu} + \text{Ag}$), М16 на 99,95 % ($\text{Cu} + \text{Ag}$), М3р на 99,5 % ($\text{Cu} + \text{Ag}$).

Свариваемость меди в значительной степени определяется наличием в ней примесей. Наиболее вредной примесью является кислород, который образует с медью закись Cu_2O , что способствует появлению эвтектики $\text{Cu} + \text{Cu}_2\text{O}$, снижающей стойкость против образования горячих трещин. Вместе с этим образуется оксид меди CuO — тугоплавкое и нерастворимое в меди соединение, засоряющее сварочную ванну.

Вредными примесями, способствующими образованию горячих трещин, являются висмут, сурьма и свинец, содержание которых не должно превышать соответственно 0,003; 0,005 и 0,03 %.

При наличии в меди растворенного водорода протекает его реакция с закисью меди; образующиеся при этом пары воды не успевают выделиться из жидкого металла и накапливаются в кристаллической решетке. Создавая большое давление, пары

воды способствуют образованию холодных трещин; это явление носит название «водородная болезнь». Поэтому содержание кислорода в меди не должно превышать 0,01 %.

Водород может быть причиной пористости сварных швов: вследствие скачкообразного изменения его растворимости при переходе металла из жидкого состояния в твердое и быстрой кристаллизации он не успевает выделиться из сварочной ванны. Применение предварительного, а иногда и сопутствующего подогрева позволяет увеличить длительность пребывания сварочной ванны в жидком состоянии и способствует выделению водорода. Эти меры направлены также на преодоление трудности, связанной с большой теплопроводностью меди, когда на начальной стадии сварки затрудняется образование сварочной ванны, что приводит к непровару.

Относительно влияния азота на пористость меди единой точки зрения нет. Считается, что при поглощении металлом азота из плазменной струи и последующем его выделении в объеме сварочной ванны могут возникать поры, если сварочный ток более 220 А, а при меньших его значениях поры отсутствуют. В то же время при сварке меди погруженной дугой в азотной защитной атмосфере пористости нет вследствие горения дуги в парах металла.

Из-за высокого коэффициента линейного расширения происходят не только деформации в свариваемом изделии, но и трещинообразование в результате пропорционального действия остаточных напряжений растяжения при охлаждении и коэффициента линейного расширения. Именно эти два показателя связываются с провалом прочности меди в интервале температур 250–550 °С. Поэтому необходимо избегать жесткого закрепления конструкции во время сварки. В то же время после сварки деформированное изделие легко поддается правке за счет высокой пластичности меди.

Сварочная ванна обладает высокой жидкотекучестью, поэтому необходимо ограничивать ее объем, для чего применяют различные формирующие устройства, чаще всего из графита. Это ограничивает возможность выполнения сварочных работ во всех пространственных положениях. Заготовка деталей должна выполняться механическим инструментом, после термической резки обязательна механическая зачистка; свариваем-

мые кромки и присадочная проволока зачищаются до металлического блеска стальными щетками и обезжириваются ацетоном или уайт-спиритом, флюс и покрытые электроды перед сваркой прокаливаются.

4.2. Газовая сварка меди

Газовая сварка используется главным образом при ремонтных работах или при изготовлении тонкостенных изделий и осуществляется мягким нормальным ацетиленокислородным пламенем. Односторонние швы стыковых соединений с отбортовкой двух кромок выполняются для меди толщиной 0,5–2,0 мм, а без отбортовки на съемной подкладке — для меди толщиной 1,0–2,0 мм; односторонние швы угловых соединений с отбортовкой одной кромки — для толщин 0,5–2,0 мм, а без отбортовки — для толщин 1,0–2,5 мм. Швы тавровых соединений — односторонние и двухсторонние — применяются для медных листов толщиной 1,0–2,5 мм. Листы толщиной до 3 мм сваривают без разделки кромок, при больших толщинах делают V-образную разделку с углом 60–70° и притуплением 1,5 мм. Зазоры во всех случаях — минимальные 0–1 мм.

Мощность пламени почти в 2 раза больше, чем для сварки стали: 155–175 л/ч ацетилена на 1 мм толщины свариваемой детали толщиной 3–4 мм и 175–225 л/ч на 1 мм толщины для деталей толщиной 8–10 мм.

Большие толщины свариваются двумя, а то и тремя горелками (две из них подогревают металл) в один слой с максимальной скоростью, чтобы избежать роста зерна и образования пор.

В качестве присадки применяют проволоку разных марок в соответствии с ГОСТ 16130–90: МСр-1, МНЖКТ 5–1–0,2–0,2 и др., в которых содержатся активные раскислители P, Al, Si, Mn. Если присадочная проволока не содержит фосфора и кремния, обязательно применение флюсов, которые растворяют оксиды, переводят их в легкоплавкий шлак и защищают расплавленный металл от дальнейшего окисления (табл. 4.1). Флюс наносится на свариваемые кромки и прутки в виде пас-

ны, в которой компоненты растворены в дистиллированной воде или спирте.

Таблица 4.1. Флюсы для газовой сварки меди и ее сплавов

Номер флюса	Содержание компонентов, % (по массе)							
	Бура прокаленная	Борная кислота	Калий фосфорнокислый	Кварцевый песок	Древесный уголь	Натрий хлористый	Калий углекислый	Кальций фтористый
1	100	—	—	—	—	—	—	—
2	—	100	—	—	—	—	—	—
3	50	50	—	—	—	—	—	—
4	75	25	—	—	—	—	—	—
5	50	35	15	—	—	—	—	—
6	50	—	15	15	20	—	—	—
7	70	10	—	—	—	20	—	—
8	56	—	—	—	—	22	22	—
9	20	80	—	—	—	—	—	—
10	21	70	—	—	—	—	—	9

Диаметр присадки, как и номер наконечника горелки, зависит от толщины свариваемого металла:

Толщина металла, мм	1,5	1,5–2,5	2,5–4	4–8	8–15	15
Диаметр присадки, мм	1,5	2	3	4–5	6	8
Номер наконечника	2–3	3	4–5	5	6–7	7

Детали собираются в нижнем положении под углом 7–10° к горизонтали для лучшего заполнения разделки. При этом используются скользящие фиксаторы, прихватки допускаются в крайних случаях, если нельзя реализовать фиксаторы. В этом случае для сборки применяют ту же проволоку, что и для сварки. Высота прихватки не должна быть больше $\frac{1}{3}$ глубины разделки или катета шва, в этом случае не нужно вырубать прихватки перед сваркой. Длина прихватки равна толщине свариваемого металла, а расстояние между ними 15–20 толщин при толщине металла до 10 мм и 6–8 толщин для более толстого металла. Перед постановкой прихваток металл подогревается до требуемой температуры. В перерывах между технологическими

мые кромки и присадочная проволока зачищаются до металлического блеска стальными щетками и обезжириваются ацетоном или уайт-спиритом, флюс и покрытые электроды перед сваркой прокаливаются.

4.2. Газовая сварка меди

Газовая сварка используется главным образом при ремонтных работах или при изготовлении тонкостенных изделий и осуществляется мягким нормальным ацетиленокислородным пламенем. Односторонние швы стыковых соединений с отбортовкой двух кромок выполняются для меди толщиной 0,5–2,0 мм, а без отбортовки на съемной подкладке — для меди толщиной 1,0–2,0 мм; односторонние швы угловых соединений с отбортовкой одной кромки — для толщин 0,5–2,0 мм, а без отбортовки — для толщин 1,0–2,5 мм. Швы тавровых соединений — односторонние и двухсторонние — применяются для медных листов толщиной 1,0–2,5 мм. Листы толщиной до 3 мм сваривают без разделки кромок, при больших толщинах делают V-образную разделку с углом 60–70° и притуплением 1,5 мм. Зазоры во всех случаях — минимальные 0–1 мм.

Мощность пламени почти в 2 раза больше, чем для сварки стали: 155–175 л/ч ацетилена на 1 мм толщины свариваемой детали толщиной 3–4 мм и 175–225 л/ч на 1 мм толщины для деталей толщиной 8–10 мм.

Большие толщины свариваются двумя, а то и тремя горелками (две из них подогревают металл) в один слой с максимальной скоростью, чтобы избежать роста зерна и образования пор.

В качестве присадки применяют проволоку разных марок в соответствии с ГОСТ 16130–90: МСр-1, МНЖКТ 5–1–0,2–0,2 и др., в которых содержатся активные раскислители Р, Al, Si, Мп. Если присадочная проволока не содержит фосфора и кремния, обязательно применение флюсов, которые растворяют оксиды, переводят их в легкоплавкий шлак и защищают расплавленный металл от дальнейшего окисления (табл. 4.1). Флюс наносится на свариваемые кромки и прутки в виде пас-

ты, в которой компоненты растворены в дистиллированной воде или спирте.

Таблица 4.1. Флюсы для газовой сварки меди и ее сплавов

Номер флюса	Содержание компонентов, % (по массе)							
	Бура прокаленная	Борная кислота	Калий фосфорнокислый	Кварцевый песок	Древесный уголь	Натрий хлористый	Калий углекислый	Кальций фтористый
1	100	—	—	—	—	—	—	—
2	—	100	—	—	—	—	—	—
3	50	50	—	—	—	—	—	—
4	75	25	—	—	—	—	—	—
5	50	35	15	—	—	—	—	—
6	50	—	15	15	20	—	—	—
7	70	10	—	—	—	20	—	—
8	56	—	—	—	—	22	22	—
9	20	80	—	—	—	—	—	—
10	21	70	—	—	—	—	—	9

Диаметр присадки, как и номер наконечника горелки, зависит от толщины свариваемого металла:

Толщина металла, мм	1,5	1,5—2,5	2,5—4	4—8	8—15	15
Диаметр присадки, мм	1,5	2	3	4—5	6	8
Номер наконечника	2—3	3	4—5	5	6—7	7

Детали собираются в нижнем положении под углом $7-10^\circ$ к горизонтали для лучшего заполнения разделки. При этом используются скользящие фиксаторы, прихватки допускаются в крайних случаях, если нельзя реализовать фиксаторы. В этом случае для сборки применяют ту же проволоку, что и для сварки. Высота прихватки не должна быть больше $\frac{1}{3}$ глубины разделки или катета шва, в этом случае не нужно вырубать прихватки перед сваркой. Длина прихватки равна толщине свариваемого металла, а расстояние между ними 15—20 толщин при толщине металла до 10 мм и 6—8 толщин для более толстого металла. Перед постановкой прихваток металл подогревается до требуемой температуры. В перерывах между технологическими

операциями изделие нельзя охлаждать ниже $T = 200\text{--}250\text{ }^{\circ}\text{C}$, чтобы прихватки не разрушились.

Сварка проводится в такой последовательности: 1) горелкой под углом 90° нагревают соединяемые кромки, при необходимости применяют еще одну или две горелки; 2) после образования ванны на основном металле расплавляется присадочный пруток, образуется сварочная ванна; 3) горелка устанавливается под углом $30\text{--}40^{\circ}$ с наклоном к изделию, а присадочный пруток — под углом $30\text{--}40^{\circ}$ к горелке, ядро пламени располагается на расстоянии $6\text{--}10$ мм от расплавленного металла; 4) сварка ведется восстановительной зоной пламени только в один проход снизу вверх на подъем левым способом при толщине листов до 5 мм и правым способом — при большей толщине; 5) периодически во время сварки на кончике проволоки непосредственно в зону сварки подается флюс. Этой проволокой обрабатывается и перемешивается жидкий металл. Проволока почти не удаляется из сварочной ванны; 6) после сварки требуется проковка: при толщине листа до 4 мм в холодном состоянии, при больших толщинах — при $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Газовая сварка меди толщиной более $14\text{--}15$ мм выполняется в вертикальном положении одновременно с двух сторон двумя сварщиками. После сварки участки длиной $80\text{--}150$ мм подогревают до $T = 800\text{--}900\text{ }^{\circ}\text{C}$ и проковывают с двух сторон пневматическими молотками с закругленными бойками для получения мелкозернистой структуры металла шва и повышения его пластичности. Не допускается резкое охлаждение под действием сквозняков и холодного воздуха. Шов зачищают 2% -ным раствором азотной или серной кислоты и промывают водой для удаления остатков флюса. Для придания сварному шву большей вязкости после проковки его вместе с околошовной зоной быстро нагревают до температуры $550\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ и быстро охлаждают в воде.

4.3. Ручная дуговая сварка меди графитовым электродом

Ручная дуговая сварка применяется для сварки меди толщиной до 15 мм, если для сварного изделия примене-

на нераскисленная медь, на постоянном токе прямой полярности. В качестве присадки используются прутки из бронз Бр0Ф9–0,3, БрКМц3–1 и флюса. Графитовые электроды затачиваются на конус с притуплением на рабочем конце 2–3 мм. Медь толщиной до 4 мм сваривается без разделки кромок и без подогрева, толщиной 4–12 мм с V-образной разделкой с углом раскрытия 70–90°, притуплением 2–3 мм и предварительным подогревом до $T = 400–600$ °С. Стыковые соединения выполняют на флюсовой подушке или графитовой подкладке с канавкой для формирования шва с обратной стороны и зазором 1–3 мм (в зависимости от толщины металла) на параметрах режима, данных в табл. 4.2. Перед сваркой начало шва подогревается без подачи присадочной проволоки. Она подается после образования жидкой ванны.

Таблица 4.2. Ориентировочные параметры режима сварки стыковых соединений меди графитовым электродом

Толщина металла, мм	$d_{сз}$, мм	$d_{прис}$, мм	$I_{св}$, А	U_d , В
2	6–7	3–4	125–200	40–45
5	8	4–5	200–350	40–50
8	10–12	6–8	300–450	40–50
13	15	8–10	500–700	40–50

Примечание. Сварка ведется на постоянном токе прямой полярности.

Сварка ведется длинной дугой на подъем, при угле подъема деталей 15–20°, углом вперед. Угол наклона электрода к горизонтали 70–80°, а присадочной проволоки 30–40°; присадка не погружается в сварочную ванну, а находится на расстоянии 5–6 мм от ее поверхности.

Чтобы не охлаждать сварочную ванну, процесс ведется с максимально возможной скоростью не ниже 0,25 м/мин, а дуга направляется только на жидкую ванну и не выводится на основной металл. Сварка ведется «левым» или «правым» способом. «Левый» менее производительный, но сварщику удобнее наблюдать за сварочной ванной и удалять шлаки концом прутка. Полученные швы должны по ширине перекрывать разделку

на 1–2 мм на сторону, а усиление швов составляет 2–4 мм в зависимости от толщины металла. Механические и коррозионные свойства сварных швов могут быть достаточно высокими.

Ручная дуговая сварка плавящимся покрытым электродом используется для сварки металла любых толщин при соответствующей подготовке кромок на постоянном токе обратной полярности. Медный лист толщиной до 4 мм сваривается без разделки кромок; до 10 мм – с односторонней V-образной разделкой с углом 60–70° и притуплением 1,5–3 мм; при больших толщинах рекомендуется двухсторонняя X-образная разделка.

Применяются покрытые электроды марок «Комсомолец 100» и ОЗБ со стержнем из меди М1. Разработанные в ИЭС им. Е.О. Патона электроды марок АНЦ-1, АНЦ-2, АНЦ-3 и ОЗМ-3 благодаря наличию экзотермических компонентов в покрытии обеспечивают возможность сварки металла толщиной до 15 мм без предварительного подогрева. Металл шва, наплавленный электродами перечисленных марок, равноценен по своим характеристикам основному металлу. Электроды марок ЗТ и ОК94.55 (производство компании «ESAB», Швеция) имеют стержни из бронзы КМц3–1, причем ОК94.25 обеспечивает получение наплавленного металла типа оловянистой бронзы (табл. 41).

Сварку ведут напроход короткой дугой с возвратно-поступательным движением электрода, в нижнем положении или на подъем, ее начинают и заканчивают на выводных планках. По мере выполнения шва рекомендуется удалять прихватки. При обрыве дуги кратер вырубается, после чего сварка продолжается.

При сварке разнотолщинных деталей дугу направляют на кромку более толстой детали. Угловые и тавровые соединения сваривают в положении «в лодочку».

Ручная дуговая сварка вольфрамовым электродом в защитных газах выполняется на постоянном токе прямой полярности для всех видов сварных соединений во всех пространственных положениях. Стыковые швы на металле толщиной 1–2 мм сваривают с отбортовкой двух кромок, а угловые – с отбортовкой одной кромки. При сварке трубных конструкций стыковые односторонние швы сваривают «на весу» без разделки кромок для толщин 3–5 мм и с разделкой одной или двух кромок для тол-

щин 2,5–10 мм. Углы разделки кромок V-образных и Х-образных разделок лежат в пределах 60–90°. Зазоры при сварке «на весу» 1–3 мм, а на съемных подкладках 1–4 мм в зависимости от толщины металла.

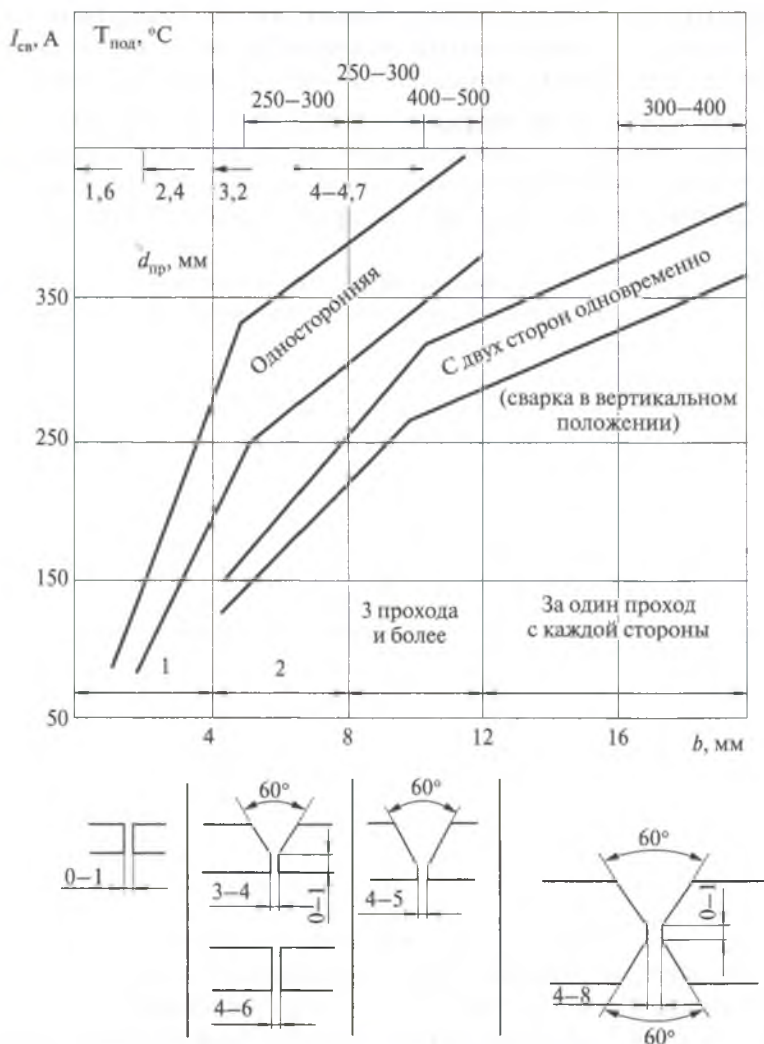


Рис. 4.1. К выбору формы подготовки кромок, температуры подогрева и параметров режима сварки меди вольфрамовым электродом

Согласно ГОСТ 16130–90, в качестве присадки рекомендуются проволоки марок БрКМц 3–1 и МНЖКТ 5–1–0,2–0,2, специальные комплексно легированные проволоки марок МРзТБ 0,1–0,1–0,008 и МРзТЦрБ 0,1–0,1–0,1, содержащие эффективные раскислители. В зависимости от толщины листа необходим предварительный подогрев до 300–500 °С. Параметры режима сварки приведены в табл. 4.2, 4.3 и на рис. 4.1.

Импульсно-дуговая сварка без присадки с подачей импульсов переменного тока с определенной частотой (табл. 4.3) эффективна при соединении металла толщиной 0,3–2,5 мм. В качестве защитных газов используются аргон и особо чистый азот.

Таблица 4.3. Ориентировочные параметры режима импульсно-дуговой сварки меди, легированной бериллием, на переменном токе вольфрамовым электродом диаметром 3 мм

Тип соединения	Толщина металла, мм	Ток, А		Время, с		Частота па-чек импульсов, Гц
		импульса	паузы	импульса	паузы	
Стыковое	0,9	100	20	0,5	1,0	1,0
	1,0	110	20	0,5	1,0	1,0
	1,5	130	30	0,7	0,7	1,0
	2,0	160	30	0,7	0,7	1,0
	2,5	180	30	0,7	0,7	1,0
Внахлестку	0,3 + 0,3	70	10	0,5	1,0	0,5
	0,5 + 0,5	120	20	0,5	0,5	0,5
	0,7 + 0,7	135	30	1,0	0,3	0,5
	0,9 + 0,9	160	30	1,0	0,3	0,5
	0,3 + 0,9	110	10	0,5	0,7	1,0
	0,3 + 1,5	140	10	0,7	0,5	1,5
	0,3 + 2,5	190	10	1,0	0,5	1,5
	0,9 + 1,5	170	30	0,7	0,3	1,5
	0,9 + 2,5	220	30	1,0	0,3	1,5

Вначале дуга зажигается на графитовой пластине, а потом переносится к месту сварки или непосредственно на месте сварки с помощью осциллятора. Сварка корневых швов ведется напроход без поперечных колебаний горелки, все последующие валики — с плавными поперечными колебаниями. При

сварке стыковых соединений электрод располагается перпендикулярно свариваемой поверхности, при угловых и тавровых соединениях (при одинаковой толщине деталей) и внахлестку — по биссектрисе угла. Если толщины деталей не одинаковы, дугу смещают на более толстую деталь, чтобы большая часть теплоты выделялась на ней. Конец сварочной проволоки должен всегда находиться в зоне газовой защиты, а сама проволока подается перпендикулярно вольфрамовому электроду.

В процессе сварки нельзя касаться вольфрамовым электродом свариваемого металла или сварочной ванны. Если это случилось, дефектное место удаляют механическим путем, обезжиривают и протирают чистой ветошью, после чего возбуждают дугу и продолжают сварку. В конце шва нужно плавно погасить дугу, медленно переводя горелку на выполненный участок шва, и 10–15 с защищать металл шва от окисления, после чего убрать горелку. Заварка кратера производится без присадки. Число обрывов дуги нужно сводить к минимуму.

Сварку угловых швов выполняют «в лодочку». Каждый валик зачищают стальной щеткой и осматривают перед наложением последующего, выявленные дефекты удаляют. При сварке участками начало каждого последующего валика смещается по отношению к предыдущему на 10–15 мм. Сварку ведут непрерывно до полного окончания процесса.

В случае приварки фланца к трубе для лучшей защиты шва нужно, чтобы ось вольфрамового электрода в каждый данный момент совпадала с плоскостью, проходящей через ось трубы.

4.4. Автоматическая сварка

Автоматическая сварка вольфрамовым электродом применяется чаще всего для выполнения кольцевых неповоротных стыков (табл. 4.4).

При установке автомата на трубу расстояние между соплом горелки и поверхностью трубы не должно превышать 6 мм. Сварочную проволоку направляют по касательной к окружности стыка, чтобы ее конец не касался дна разделки или поверхности предыдущего слоя и был на расстоянии 3–4 мм от точки

касания с вольфрамовым электродом. Отклонение электрода от линии стыка должно быть не более 0,5 мм, а его ось должна совпадать с осью трубы.

Таблица 4.4. Ориентировочные параметры режима автоматической сварки вольфрамовым электродом кольцевых швов медных труб

Толщина металла, мм	$d_{\text{э}}, \text{мм}$	$I_{\text{св}}, \text{А}$	$V_{\text{св}}, \text{м/ч}$	Число проходов
5	4	260 – 270	15	6
7	5	270 – 290	14	8

Примечание. Напряжение на дуге 10–11 В; диаметр присадочной проволоки 1,6 мм при $V_{\text{пз}} = 36 \text{ м/ч}$; расход гелия 7–10 л/мин.

Перед началом сварки шланги и горелка продуваются гелием; полость трубы также заполняется гелием. При наличии зазора дуга зажигается на прихватке и с ее помощью проводится подогрев начального участка длиной 10–20 мм, который должен находиться в потолочном положении, без подачи электродной проволоки. После образования сварочной ванны подается присадочная проволока. При сварке корневого шва электрод перемещается над линией стыка, а присадочная проволока — по линии стыка с отклонением от оси в сторону не более 0,5 мм. При заполнении разделки сварщик смещает электрод и присадочную проволоку поочередно к скосам разделки в зависимости от расположения и формирования предыдущего валика. Если он смещен, шов на этом участке переплавляется без подачи проволоки. Начало каждого валика нужно перекрывать на 10–20 мм в сторону уже выполненного. Время гашения дуги — не менее 5 с, но после остановки автомата гелий подается в горелку еще 10–15 с.

Если сварка выполняется в особо чистом азоте, в качестве присадки используется только проволока из сплава МНЖКТ5–1–0,2–0,2, а процесс ведется при длине дуги, в 2–2,5 раза большей, чем при использовании инертных газов (табл. 44).

Плазменная сварка благодаря высокой концентрации тепловой мощности позволяет сваривать стыковые соединения меди толщиной до 60 мм без разделки кромок. В качестве плазмооб-

разующего газа применяется смесь аргона и гелия, а для защиты сварочной ванны и хорошего формирования шва — флюс марки АН-26С. Как присадочная используется специальная порошковая проволока марки ПП-БрХТ-1,2—0,2, содержащая раскисляющие и легирующие элементы. Благодаря этому не образуются кристаллизационные трещины и увеличивается деформационная способность сварных соединений при сварке на режимах, параметры которых даны в табл. 4.5.

Таблица 4.5. Ориентировочные параметры режима автоматической плазменной сварки меди

Тип шва	Толщина металла, мм	$I_{св}$, А	U_d , В	$V_{св}$, м/ч	Расход газа, л/мин	
					Аг	He
Односторонний	20	940—1050	44—46	3,2—4,0	5,5	22
	30	1200—1300	50—52	2,2—2,4	5,5	24
	40	1270—1380	50—54	2,0—2,2	7,5	26
Двухсторонний	40	1150	48—52	2,8—3,0	5,5	24
	60	1380—1400	50—54	1,8—2,0	7,5	26
	80	1480	52—56	1,2—1,4	11	30

При плазменной сварке меди для уменьшения ширины шва следует увеличивать расход плазмообразующего газа, утапливать электрод в сопле, уменьшать ток и зазор в стыке, а для увеличения глубины провара нужно также уменьшать расстояние от торца сопла до изделия.

Программированное изменение параметров режима плазменной приварки фланцев из бронзы БрХ0,7 к корпусу цилиндрического медного кристаллизатора осуществляется следующим образом: 1) сварка ведется «в лодочку», плазмообразующим газом в начале процесса является аргон; 2) зажигается дуга между вольфрамовым электродом диаметром 8 мм и изделием на токе 250—300 А; 3) ток увеличивается до 600—650 А при напряжении 60—62 В; 4) к аргону добавляется гелий и при их соотношении 50:50 с общим расходом 7—8 л/мин 10—12 мин подогревается цилиндр до создания жидкой сварочной ванны; 5) присаживается проволока марки БрКМц3—1 диаметром 2 мм со скоростью 90 м/ч и задается скорость сварки 6 м/ч;

б) по выполнении полного оборота шов перекрывается на 30–40 мм; 7) ток снижается до 250–300 А и прекращается подача газа. Такая ступенчатая схема введения теплоты целесообразна для сварки меди больших толщин (30–60 мм).

Ступенчатая схема может быть реализована при использовании трехдугового плазмотрона, в котором первая и третья дуги горят между вольфрамовыми электродами на токах соответственно 600 и 750 А, а вторая горит между присадочной проволокой марки БрКМц3–1 диаметром 2 мм на токе 450–500 А. Ток первой дуги проплавляет верхний слой на $1/3$ толщины, дуга плавящегося электрода горит в глубине расплавленного металла, увеличивая провар до $1/2$ толщины, а третья проплавляет металл до конца, причем все это осуществляется в общей сварочной ванне длиной 100–170 мм. Каждая дуга питается от собственного источника питания. Расход плазмообразующего газа составляет 12–15 л/мин. Для защиты плавильного пространства используется смесь флюсов марок АН-26 и АН-60, которая наносится слоем 15–20 мм. Сварка ведется за один проход без разделки кромок и подогрева на скорости, в 1,5–2 раза большей, чем при однодуговом процессе.

Особенно эффективно применение микроплазменной сварки тонкостенных труб из меди и медных сплавов; в этом случае плазмообразующим газом является аргон, а защитным — гелий (табл. 4.6).

Таблица 4.6. Ориентировочные параметры режима автоматической микроплазменной сварки тонкостенных труб

Марка материала	Размер трубы	$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	$Q_{газ}$, л/мин		
				Аг	Не	Защита корня шва
Медь М1	6,0×0,5	29	60	0,5	1,5	0,4
Латунь Л63	8,8×0,3	26	140	0,4	1,7	0,2
Латунь Л90	8,8×0,3	29	110	0,4	1,4	0,3
Бронза БрБ2	8,8×0,3	26	90	0,2	1,5	0,3

Механизированная сварка плавящимся электродом выполняется на постоянном токе обратной полярности и характеризуется производительностью, в 2–3 раза большей, чем при сварке не-

плавящимся электродом. Однако в этом случае стабильность горения дуги хуже, как и возможность получения беспористых швов, особенно при плотности тока более 300 А/мм^2 в аргоне и 110 А/мм^2 в азоте. Медь толщиной до 10 мм сваривают без разделки кромок, от 10 до 25 мм выполняется V-образная разделка, а при больших толщинах — X-образная разделка с притуплением 2–3 мм и углом раскрытия кромок $60\text{--}70^\circ$. Ширина зазора зависит от свариваемых толщин и составляет 2–5 мм при использовании остающихся подкладок из раскисленной меди шириной 15–20 мм и толщиной 2–3 мм, 1,5–4 мм для съемных подкладок, 0–3 мм для трубных конструкций, 0–4 мм для двухсторонней сварки «на весу». Зазоры между остающимися подкладками и изделием для сварных соединений, контролируемых проникающим излучением, должны быть не более 0,2 мм в трубопроводах и 0,5 мм в других конструкциях, а в неконтролируемых — не более 1 мм.

При сварке в смеси аргона с азотом (содержание по массе последнего от 8 до 30 %) процесс довольно стабильный при повышенном разбрызгивании, которое уменьшается при плотности тока $230\text{--}240 \text{ А/мм}^2$. При увеличении этого показателя до 300 А/мм^2 разбрызгивание становится еще меньше, но в кратерах шва образуются трещины, особенно в швах с жесткими узлами.

Процесс сварки в чистом азоте весьма стабильный, но разбрызгивание выше, чем при сварке в смеси $\text{Ar} + \text{N}_2$. При сварке больших толщин рекомендуется вести процесс в газовой смеси 70–80 % $\text{Ar} + 30\text{--}20 \text{ % } \text{N}_2$, однако шов лучше формируется при сварке в инертных газах. В качестве присадки используется проволока МНЖКТ5–1–0,2–0,2, и только для конструкций с малой жесткостью можно применять проволоку из бронзы БрКМц3–1.

Для сварки в среде аргона можно рекомендовать медную проволоку производства компании «ESAB» (Швеция) марки ОК Autrod 19.12 (0,2 % Si, 0,2 % Mn, 0,8 % Sn, остаток Cu). При полуавтоматической сварке диаметр электродной проволоки не более 1,4 мм. Перед сваркой необходим предварительный подогрев кромок до $200\text{--}500^\circ\text{C}$. Сварка ведется на постоянном токе обратной полярности на параметрах режима, приведенных на рис. 4.2 и в табл. 45.

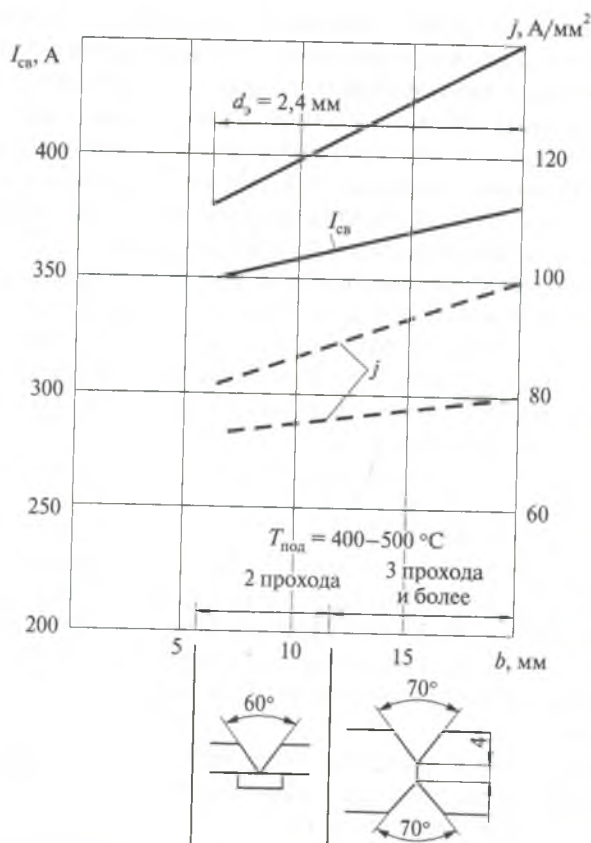


Рис. 4.2. К выбору параметров режима механизированной сварки меди плавящимся электродом в защитных газах

При азотно-дуговой сварке можно избежать разбрызгивания металла, если вести процесс погруженной дугой на параметрах режима, при которых достигается струйный перенос электродного металла: $I_{св} \geq 220$ А, $U_{д} = 22-25$ В для проволоки диаметром 2 мм; $I_{св} \geq 350$ А, $U_{д} = 24-28$ В для проволоки диаметром 3 мм.

Сварка начинается и заканчивается на технологических планках 100×100 мм с формой разделки и толщиной, как у основного металла. В случае вынужденных остановок кратер ранее выполненного шва после вырубки и зачистки перекрыва-

ется на 15–30 мм. Сварку ведут горелкой, наклоненной углом вперед на 10–15° от вертикали; расстояние от сопла горелки до свариваемого металла 20–25 мм с длиной дуги в пределах 1–2 диаметра электрода. Так как металл характеризуется высокой жидкотекучестью, то, чтобы избежать подтекания под основание дуги и уменьшения проплавления, сварку ведут на подъем с наклоном изделия на 4–6°. Угловые швы и соединения внахлестку выполняются «в лодочку», как при сварке неплавящимся электродом. Швы длиной 500–700 мм выполняются за один проход, длинные сваривают обратноступенчатым способом.

Автоматическая сварка меди толщиной до 10 мм под флюсом выполняется с применением как стандартных плавящихся флюсов для сварки сталей (АН-348А, АН-20С), так и керамического флюса ЖМ-1. Для больших толщин следует применять специальный флюс сухой грануляции марки АНМ-13, имеющий состав: 32–36 % SiO_2 ; 8–12 % Al_2O_3 ; 8–12 % MnO ; 0,2–1,0 % Mn_2O_3 ; 15–18 % MgO ; 0,7–1,5 % TiO_2 ; 22–30 % CaF_2 ; $\text{CaO} \leq 6\%$; $\text{FeO} \leq 1\%$; P и $\text{S} \leq 0,1\%$. Перед сваркой кромки разделяются только механическим способом. Углы при V-образной разделке составляют 30°, притупления 5–8 мм, зазор 0–0,5 мм. Медные технологические планки (заходные и выводные) 75×100 мм имеют ту же толщину и подготовку кромок, что и основной металл. Зазор между ними и торцами изделия — не более 1 мм, иначе в швах могут появиться трещины.

Присадочная проволока выбирается в зависимости от марки флюса. Так, для флюсов АН-348А, АН-20С рекомендуются проволоки марок М1, БрКМц3–1, БрОЦ4–3; для керамического флюса ЖМ-1 — проволоки М1, М2; для флюса АНМ-13 — проволоки М1, БрХТ 0,6–0,5. Прихватки выполняются теми же проволоками, что и для сварки. Длина прихваток 50–100 мм, шаг 300–400 мм. Сварка ведется на постоянном токе обратной полярности или на переменном токе (табл. 46).

Сварка начинается на технологической планке путем возбуждения дуги между электродом и изделием через медную или латунную обезжиренную стружку. При отсутствии планки необходим предварительный подогрев до 200–300 °С, а сварку начинают на расстоянии 20–40 мм от кромки во избежание об-

разования продольной трещины. Сварка ведется на графитовой или флюсовой подушке за один проход с полным проваром соединяемых кромок.

Служебные характеристики металла шва зависят от состава электродного металла и марки флюса. Так, при использовании комбинации флюсов ЖМ-1 и АНМ-13 с проволокой М1 свойства сварного шва практически такие же, как у основного металла, а в остальных рассмотренных выше случаях электрическая проводимость и теплопроводность снижены.

Электрошлаковая сварка меди наиболее целесообразна при изготовлении изделий с большим поперечным сечением без разделки кромок. Для этой цели применяются пластинчатый электрод или плавящийся мундштук из того же материала, сварочные проволоки марок БрКМц3-1 и БрОЦ4-3 и специальный легкоплавкий флюс марки АНМ-10 на основе фторидов щелочно-земельных металлов (50–70 % NaF, 10–20 % LiF, 10–20 % CaF₂, 5–10 % SiO₂, 3 % CaO).

Присадочным материалом служат медные пластины того же состава и сварочная проволока марки БрКМц3-1 или БрОЦ4-3 диаметром 3 мм. В качестве формирующих используются графитовые пластины. Сварка медных заготовок сечением 140×160 мм ведется пластинчатым электродом толщиной 18 мм на повышенном сварочном токе 8000–10 000 А, $U_{\text{шв}} = 40\text{--}50$ В. Глубина шлаковой ванны равна 60–70 мм.

Замедленное охлаждение зоны термического влияния увеличивает размер зерна в ней, однако в результате благоприятного срастания кристаллитов при вертикальной сварке отсутствует зона слабину, характерная для металла, сваренного дуговым способом в нижнем положении, поэтому механические свойства металла шва практически не отличаются от свойств основного металла.

Электрошлаковый процесс может быть использован для наплавки меди на стальную заготовку в нижнем положении, когда разогрев поверхности, на которую ведется наплавка, осуществляется шлаковой ванной с использованием графитового электрода, а присадка плавится за счет тепловой энергии сварочной ванны. Флюс марки АН-М10 предварительно расплавляется в тигле, и образовавшийся перегретый шлак заливается

в наплавляемую полость заготовки. После этого выполняется задержка на заданных параметрах режима для нагрева поверхностного слоя наплавляемой зоны до $T = 1100\text{--}1300\text{ }^{\circ}\text{C}$, при которой осуществляется теплхимическая обработка основного металла, необходимая для смачивания твердой поверхности жидким расплавом. Затем в шлаковую ванну небольшими порциями вносится медная присадка в виде порошка, мелкой стружки или стержней. Ее количество определяется исходя из расчетного слоя наплавленного слоя и припуска на механическую обработку. После расплавления присадки процесс останавливается, затвердевший шлак и формирующие устройства удаляются.

Электронно-лучевая сварка затруднена интенсивным испарением металла в вакууме при перегреве выше температуры плавления и его высокой теплопроводностью.

Вследствие потерь на испарение из-за высококонцентрированной мощности луча ослабляется сечение шва при сварке тонколистового металла, а при сварке металла больших толщин происходит его разбрызгивание и ухудшается формирование шва. Поэтому тонколистовой металл сваривается расфокусированным лучом или колеблющимся пучком, а при сварке меди больших толщин применяются электронно-оптические системы, обеспечивающие равномерность распределения теплоты по сечению пучка при большом тепловложении (табл. 4.7).

Таблица 4.7. Ориентировочные параметры режима электронно-лучевой сварки меди

Толщина металла, мм	$I_{\text{п}}$, мА	$U_{\text{уск}}$, кВ	$V_{\text{св}}$, м/ч
1	70	14	20
2	120	16	20
4	200	18	18
6	250	20	18

При сварке меди больших толщин применяются электронно-оптические системы, которые обеспечивают равномерность тока по сечению пучка при большом тепловложении.

После сварки этим способом шов имеет мелкозернистую структуру с механическими свойствами, близкими к свойствам для основного металла.

4.5. Электрическая контактная сварка

Контактная сварка меди затруднена вследствие ее высокой электрической проводимости и теплопроводности, а также узкого диапазона температур, в котором металл может свариваться давлением.

Перед сваркой поверхности обрабатываются механическими и химическими способами. Точечная и шовная сварка выполняется на особенно жестких режимах с обязательным использованием тепловых экранов толщиной 0,25–0,35 мм из нержавеющей стали между электродами и деталями или металлокерамических электродов (вставок) из молибдена или вольфрама для уменьшения стока теплоты в электроды. Таким образом привариваются медные проволоки диаметром 0,47 мм якорной обмотки к медным коллекторным ламелям электродвигателя (диаметр коллектора 8,6 мм). Сварка выполняется на пластине вольфрамовым электродом с диаметром рабочей части 1–1,5 мм на сварочном токе 1–3,6 кА, $F_{\text{давл}} = 10\text{--}80$ даН. Место сварки во время процесса обдувается воздухом или аргоном; в результате нагрева до 500 °С ламель деформируется и обжимает проволоку.

Другой способ предполагает при сварке медных пластин толщиной 0,2; 0,5 и 1,0 мм размещение между ними порошкообразной прослойки из самофлюсующегося сплава ПГ-СР с высоким электрическим сопротивлением. Благодаря большому контактному сопротивлению прослойка расплавляется, вытесняя продукты на периферию, что интенсифицирует конвективный разогрев основного металла в зоне сварки. Поверхностные пленки, оксиды полностью разрушаются и перераспределяются в жидком металле ядра, а нерастворимые соединения концентрируются на его периферии. Их остатки нейтрализуются легирующими компонентами прослойки —

марганцем, кремнием и бором, обеспечивая формирование качественного ядра точки.

Перед сваркой сплав ПГ-СР смешивается с токопроводящими веществами — водой и глицерином — до пастообразного состояния и наносится шпателем слоем толщиной до 0,3 мм. Сварка выполняется на сварочной машине МТ-1928 электродом диаметром 16 мм, заточенным на сферу радиусом 80 мм, на параметрах режима: $I_{\text{св}} = 15\text{--}20$ кА; $t_{\text{имп}} = 0,3\text{--}0,5$ с; $t_{\text{ков}} = 0,2\text{--}0,4$ с.

Шовная сварка выполняется с нахлесткой листов, ее длина выбирается по табл. 1.26.

Стыковая сварка сопротивлением выполняется при концентрированном нагреве контактной зоны и больших скоростях осадки 150–250 мм/с. При этих условиях исключается возможность разупрочнения металла и обеспечиваются высокие пластические и электрические свойства соединений при сварке на параметрах режима, приведенных в табл. 4.8.

Таблица 4.8. Ориентировочные параметры режима стыковой конденсаторной сварки медной проволоки

Диаметр проволоки, мм	Емкость конденсаторов, мкФ	Напряжение зарядки конденсаторов, В	Усилие осадки, даН
1,6	260	900	1,4
2,0	380	1000	1,4
2,8	380	1400	1,5
3,0	540	1500	1,6
3,2	550	1500	1,8

Нагрев медной проволоки при стыковой свободной сварке ухудшает пластичность металла шва вследствие разупрочнения границ зерен при выделении серы, эвтектики $\text{Cu}\text{--}\text{Cu}_2\text{O}$, из-за образования межкристаллических трещин, роста размеров зерна, микропор и других несовершенств кристаллической решетки. Если обеспечить принудительное формирование соединения в пластическом состоянии при неравномерном все-стороннем обжатии, его качество значительно улучшается, особенно при сварке проволок разного диаметра на параметрах режима, данных в табл. 1.32, ☁ 23 и 4.9.

Таблица 4.9. Ориентировочные параметры режима стыковой ударно-дуговой сварки проволок

Металл проволок	Емкость конденса- торов, мкФ	Напряжение зарядки конденсато- ров, В	Сопротив- ление раз- рядной сети, Ом	Усилие осадки, даН	Энергия, которая накапли- вается, Дж
<i>Проволока Ø 0,5 мм</i>					
Медь + медь	100	450	0,5	0,17	10
Медь + никель	100	500	0,5	0,35	12,5
Никель + никель	180	700	1,0	0,35	44,2
<i>Проволока Ø 1,0 мм</i>					
Медь + медь	200–280	1100	0,5	2,1	170
Медь + никель	200–380	1200	1,0–1,8	1,75	144

При сварке оплавлением требуется особая техника ведения процесса: на торцах свариваемых деталей очень важно поддерживать слой жидкого металла и прогревать их на значительную глубину для дальнейшей осадки, которую лучше осуществлять под током. Установочная длина вылета медных деталей выбирается в пределах 2–2,5 диаметра свариваемых стержней, скорость оплавления должна быть близкой 10 мм/с, а цикл сварки — не более 1–2 с. Остальные параметры режима приведены в табл. 1.34, 4.10.

Таблица 4.10. Ориентировочные параметры режима стыковой сварки оплавлением заготовок из меди

Заготовка	Установочная длина, мм	Удельное дав- ление осадки, МПа	$I_{св}$, А	Вторичное на- пряжение, В
Прутки Ø 10 мм	20	370	33	6
Труба Ø 9,5×1,5 мм	20	285	20	5
Полоса 45×10 мм	20	220	60	10

4.6. Сварка меди в твердой фазе

Такая сварка лучше всего выполняется в холодном состоянии.

Холодная точечная сварка меди принципиально не отличается от сварки алюминия, но требует значительно большей степени деформации для получения необходимого провара, поэтому пуансоны имеют большую высоту, что обеспечивает большее углубление и периферийный провар. Свариваемость меди определяется степенью ее чистоты и начальным состоянием — наклепанным или отожженным, разброс может быть значительным, считается удовлетворительной на уровне 11–14 %, когда сварное соединение свободно от непроваров (табл. 47).

В связи с глубоким деформированием меди возникает значительное коробление и при сварке одиночными точками последующая точка может разрушить предыдущую. Поэтому необходимо либо применять многоточечную сварку, либо предварительно обжимать зону сварки в специальных приспособлениях. Оптимальная свариваемость достигается при ширине прямоугольных пуансонов, близкой к толщине свариваемых листов, или при круглых пуансонах, диаметр которых равен двум толщинам свариваемых листов. Более предпочтительны узкие прямоугольные или эллиптические пуансоны, интенсивно деформирующие место сварки и более равномерно передающие на него удельные давления без значительного коробления изделия. Предварительный отжиг меди позволяет получить показатели свариваемости на уровне наклепанного металла, но со значительно меньшими усилиями сжатия.

Холодная стыковая сварка меди требует гораздо больших усилий осадки и зажатия деталей по сравнению с алюминием. При этом наибольшие удельные давления достигают 2200–2500 МПа, поэтому для обеспечения достаточных усилий зажатия деталей с большим сечением применяют механизмы жесткой клиновой системы с предварительным торцевым поджатием клиньев и рифленой поверхностью зажимающих частей. В зависимости от диаметра и степени наклепа припуск на сварку составляет 1,25–1,75 диаметра. Сварку сильно наклепанной меди следует производить с двойной осадкой; надежный про-

вар можно получить с предварительной посадкой концов деталей (тогда $l_1 = l_2 = (2,0-2,2)d$) или обжимных колец (тогда $l_1 = l_2 = (1,85-2,5)d$). Предварительный отжиг меди уменьшает усиление осадки и припуск на сварку, значительно облегчая свариваемость. Удовлетворительное качество сварных соединений обеспечивается на параметрах режима, данных в табл. 1.40, 1.41 и 4.11.

Таблица 4.11. Ориентировочные параметры режима холодной стыковой сварки медных проводов

Диаметр проводов, мм	$l_1 + l_2$, мм	Вид обработки проводов	$F_{ос}$, кН
0,8	1,1 + 1,1	Наклеп	6,5
0,8	1,0 + 1,0	Отжиг	5
1,6	2,3 + 2,3	Наклеп	15
1,6	2,1 + 2,1	Отжиг	13
2,5	3,7 + 3,7	Наклеп	33
2,5	3,5 + 3,5	Отжиг	27
3,0	4,2 + 4,2	Наклеп	46
3,0	4,0 + 4,0	Отжиг	32
3,5	5,1 + 5,1	Наклеп	43
3,5	4,8 + 4,8	Отжиг	39
4,0	5,5 + 5,5	Наклеп	52
4,0	5,2 + 5,2	Отжиг	49
5,0	6,5 + 6,5	Наклеп	90
8,0	10,5 + 10,5	Наклеп	195

Примечание. Избыток усилия осадки воспринимается упорами.

При сварке деталей с большими сечениями нужно руководствоваться рекомендациями, приведенными выше для холодной стыковой сварки алюминия и его сплавов, и данными табл. 1.40.

Холодная сварка медных проводов внахлестку выполняется с учетом рекомендаций по выбору параметров режима, приведенных в табл. 1.41, а их точечная сварка выполняется с помощью тех же устройств, что и сварка алюминиевых проводов. При этом свариваемость меди составляет только 10–11 %, при

отжиге она улучшается и соответствует прочности целой проволочки.

При холодной сварке втавр медных шин глубина вдавливания пуансона в медь составляет 0,8–0,9 толщины шины; пуансон должен быть той же формы, что и привариваемый отвод. Диаметр круглого или толщина прямоугольного пуансона составляет 1,25–2,0 соответствующего размера отвода.

Холодная сварка меди сдвигом выполняется по той же схеме, что и сварка алюминия, удовлетворительное качество сварных соединений обеспечивается теми же технологическими приемами, что и при сварке алюминия, на параметрах режима, данных в табл. 4.12.

Таблица 4.12. Ориентировочные параметры режима холодной сварки сдвигом медных штабов при угле сдвига 7° (l_n – длина нахлестки)

Сечение штабов, мм	l_n , мм	Δl , мм	N_0	N	T
			кН		
1×25	20	5	1	49	66
2×25	25	6,5	2,1	55	78
3×30	30	7,5	3,7	95	130
4×40	40	8,5	6,8	120	170

Сварка трением меди может выполняться как традиционным способом на параметрах режима, приведенных в табл. 4.13, так и по получающей все большее распространение схеме сварки трением с перемешиванием. Эта схема реализуется с целью как сварки меди и ее сплавов, так и наплавки на поверхность медной пластины другого медного сплава. Например, на пластину из меди М1 толщиной 20 мм наплавляют латунь; присадкой служит пластина толщиной 5 мм. Рабочий инструмент простой формы с заплечиком диаметром 25 мм выполнен из жаропрочного сплава на основе вольфрама. Другие параметры режима: $n = 900\text{--}1250$ об/мин, $V_{св} = 50\text{--}70$ м/ч, угол наклона инструмента $2\text{--}3^\circ$. Путем последовательного выполнения прорезных швов можно получить наплавленный слой медного сплава.

при использовании многих способов сварки потери цинка могут достигать до 25 %, что влечет за собой изменение состава, структуры и свойств сварного шва и создает для сварщика крайне тяжелые условия труда. При сварке многопроходных швов трудно рассчитать состав наплавленного металла и учесть влияние термической обработки предыдущих валиков шва, которая действует при наложении последующих, вследствие чего возможны полиморфные превращения в твердом состоянии — распад твердых растворов с выделением новых фаз и плавлением эвтектик, что иногда приводит к охрупчиванию сварных швов. Для уменьшения испарения цинка применяют присадочные проволоки и прутки, содержащие кремний и алюминий, которые создают на поверхности сварочной ванны слой из плотной пленки, в значительной мере препятствующей испарению цинка.

При охлаждении после сварки появляются растягивающие напряжения как в сварном шве, так и в зоне термического влияния, вследствие чего возникает угроза коррозионного растрескивания при эксплуатации. Чтобы предупредить это явление в сварном шве, уменьшают содержание цинка и осуществляют легирование, а в основном металле — проводят термическую обработку (полную или местную). При небольшом объеме сварки термическую обработку можно заменить послойной проковкой швов.

При полной термической обработке посадку изделия в печь выполняют при $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, после чего температуру повышают со скоростью не больше $120\text{ }^{\circ}\text{C/ч}$ до $350\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$, потом выдерживают 2–8 ч при этой температуре в зависимости от толщины стенки изделия, после чего оно охлаждается вместе с печью до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ со скоростью не более $50\text{ }^{\circ}\text{C/ч}$, а затем на спокойном воздухе. При местной термической обработке нагрев ведется со скоростью $80\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C/ч}$ до $350\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$, изделие выдерживается при этой температуре не менее 2 ч, потом охлаждается до $150\text{--}180\text{ }^{\circ}\text{C}$ со скоростью не более $50\text{ }^{\circ}\text{C/ч}$, а затем уже на спокойном воздухе или под асбестом.

Газовая сварка латуней применяется при изготовлении конструкций с толщиной стенки 0,5–2,5 мм и при ремонтных работах. Дополнительные трудности связаны с активным погло-

нением сварочной ванны газов, повышенной склонностью металла шва и зоны термического влияния к трещинообразованию и значительной деформацией изделия.

Подготовка кромок для стыковых соединений толщиной 3–5 мм выполняется без их разделки, швы свариваются с одной стороны, для толщин 6–15 мм применяется V-образная разделка, для 16–25 мм — X-образная; притупление и зазор составляют 2–4 мм в зависимости от толщины. Составы присадочных проволок и флюсов выбираются с учетом преодоления трудностей по табл. 48.

Сварка ведется окислительным ацетиленокислородным пламенем, что обеспечивает уменьшение растворения водорода в жидком металле и снижение интенсивности испарения цинка. Удельная мощность пламени составляет 100–120 л/ч на 1 мм толщины свариваемого металла при соотношении $\beta = 1,3–1,4$. Диаметр присадочной проволоки выбирается в зависимости от толщины металла:

Толщина латуни, мм	1–2	2–3	4–5	6–7	8–10
Диаметр присадки, мм	2	3	5	7	9

Техника газовой сварки латуней предусматривает такие же манипуляции, что и при сварке меди, но с некоторыми отличиями. Расстояние от ядра пламени до поверхности сварочной ванны увеличивается до 5–12 мм, а само пламя направляется на конец сварочного прутка. Сварку нужно выполнять как можно быстрее и за один проход, исключая многократный нагрев свариваемого металла. Процесс ведется в основном в нижнем положении «левым» способом, при выполнении вертикальных и потолочных швов удельная мощность пламени уменьшается до 30–40 л/ч на 1 мм толщины, а диаметр присадочной проволоки меньше на 1 мм, чем при нижнем положении. При сварке в потолочном положении используется «правый» способ, чтобы давлением пламени поддерживать сварочную ванну и предупреждать ее вытекание. При толщине металла более 3 мм процесс ведется с предварительным подогревом и выполнением подварочного шва или на подкладках из нержавеющей стали. При толщинах более 6 мм выполняется многопроходная сварка и каждый последующий шов накладыв-

вается после тщательной зачистки предыдущего. После сварки рекомендуется горячая ($T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ для латуней, содержащих более 40 % цинка) или холодная (для латуней с содержанием цинка менее 40 %) проковка алюминиевым молотком. Для снятия остаточных напряжений применяется низкотемпературный отжиг при $270\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{C}$. При сварке легированными прутками качество сварных соединений выше, чем при использовании нелегированных; с увеличением толщины свариваемого металла качество сварных соединений ухудшается.

Заварка дефектов латунного литья (усадочные и газовые раковины, шлаковые включения, трещины, пористость и т.п.) выполняется с присадками подобного состава диаметром 6—8 мм и флюсами согласно табл. 4.1 в нижнем положении горелкой с наконечником № 3 для отливок со стенкой толщиной до 10 мм и наконечниками № 4 и 5 для более толстых литых изделий. Места заварки после охлаждения деталей обрабатывают пневматическим зубилом. О нормальном процессе сварки свидетельствуют отсутствие видимых паров цинка и наличие на поверхности сварочной ванны пленки серого цвета.

Газопламенная наплавка латуней производится на уплотнительные поверхности арматуры из сталей и чугуна; используются многие сплавы, кроме кремнистых латуней, не обеспечивающих прочное соединение латуней со сталью вследствие образования хрупкой зоны сплавления.

В качестве флюсов применяются те же составы, что и для сварки латуней, они вносятся вручную, кроме газообразного БМ-1.

Мощность пламени (номер наконечника), как и диаметр присадочного прутка, определяется высотой наплавленного слоя:

Толщина слоя, мм	3—4	5—6	6—7
Диаметр прутка, мм	4—6	8—10	10—12
Номер наконечника	4	5	6

Перед наплавкой поверхность детали обрабатывается механическим способом, деталь подогревается до температуры $500\text{--}900\text{ }^{\circ}\text{C}$, на наплавливаемую поверхность наносится порошкообразный флюс, после чего производится лужение слоем

0,3–0,5 мм, а дальнейшие валики наплавляются до получения нужной высоты слоя.

Наплавка ведется «левым» способом непрерывно в нижнем положении или отдельными участками обратно-ступенчатыми валиками с перекрытием предыдущего участка в месте стыка на длине 15–20 мм. При наплавке прямолинейных валиков допускается наклон наплавляемой поверхности под углом 8–15° к горизонту для увеличения высоты наплавляемого слоя. При наплавке кольцевых швов угол наклона поверхности не должен быть больше 40° к горизонту. Угол наклона горелки к горизонту составляет 45°. После наплавки каждого слоя его нужно проковать при температуре 750–800 °С. При наплавке с газообразным флюсом деталь сначала подогревается пламенем с флюсом до температуры смачивания 700 °С, после чего наплавляется первый слой по схеме на рис. 4.3 с погружением конца прутка в сварочную ванну. Второй и дальнейшие слои наплавляются таким же образом.

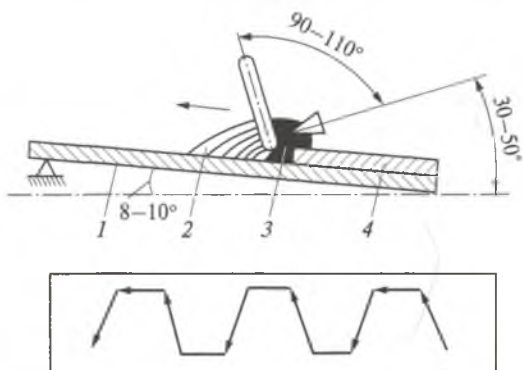


Рис. 4.3. Схема процесса газифлюсовой наплавки латуни:

1 — наплавляемая деталь; 2 — слой полуды; 3 — жидкая ванна; 4 — наплавленный металл

Ручная дуговая сварка графитовым электродом выполняется на постоянном токе прямой полярности и применяется при изготовлении изделий из свинцовистых латуней и заварке дефектов литья многих марок латуней. Сварка проводится либо на остающихся подкладках из того же металла, либо на съемных подкладках из графита с помощью скользящих креплений. При толщине латуни 3–6 мм стыковые швы свариваются одно-

сторонними швами без разделки и отбортовки кромок; при двухсторонней сварке то же возможно и для толщин до 12–14 мм. Металл толщиной 7–12 мм сваривается односторонним швом с V-образной разделкой, а при толщине 12–20 мм — с X-образной разделкой. Суммарный угол разделки кромок достигает $70 \pm 5^\circ$, номинальный зазор в стыке при сварке «на весу» составляет 0–0,5 мм, а при использовании подкладок 1–4 мм в зависимости от толщины металла. Размеры зазоров в тавровых и угловых соединениях 0–1,5 мм в зависимости от толщины. При использовании остающихся подкладок применяется латунь той же марки, а съемные подкладки с формирующими канавками изготавливаются из графита или стали. Для предупреждения вытекания жидкого металла в начале и в конце шва устанавливаются графитовые формирующие пластины, швы по ширине перекрывают разделку на 1–2 мм на сторону, а их усиления составляют 2–4 мм, что определяется толщиной металла. Сварочные материалы выбираются в зависимости от состава основного металла (табл. 4.16), а процесс ведется по данным табл. 49.

Таблица 4.16. Марки присадочных прутков и флюсов при ручной дуговой сварке латуни графитовым электродом

Марка латуни	Марка материала прутка	Марка флюса
Л63, Л68, ЛО62–1, ЛС59–1, ЛЦ16К4	ЛЦ16К4	Плавленая бура
Л90	ЛЦ16К4	Борный шлак
ЛМц58–2	ЛМц58–2	12,5 %NaCl; 50 %KCl; 35 %криолит; 2,5 %древесный уголь
ЛЦ40Мц3Ж	ЛЦ40Мц3Ж	—

Перед сваркой металл толщиной более 12–15 мм подогревается в начале шва до температуры 250–300 °С. После образования сварочной ванны в нее вводится присадочный латунный пруток с флюсами на основе буры или хлористых и фтористых солей. Сварка ведется предельно короткой дугой (не более 4 мм), электрод периодически погружается в сварочную ванну или даже постоянно находится в ней, процесс ведется быстро, без обрывов дуги.

Нельзя удлинять дугу и выводить ее на основной металл, так как это приводит к значительному испарению цинка, к ухудшению качества шва и условий работы сварщика. При вынужденных перерывах дальнейшую сварку нужно начинать с переплавления конца ранее выполненного участка шва. Если в процессе сварки появляется деформация, то необходимо чередовать наложение валиков с двух сторон шва или проковку. После сварки проводится термическая обработка — отжиг.

Ручная дуговая сварка покрытым электродом выполняется на постоянном токе обратной полярности, основные типы швов и конструктивные элементы кромок, как при сварке графитовым электродом; в качестве стержня применяются прутки из латуни, а также кремнистой или алюминиевой бронзы с покрытиями различных типов (табл. 4.17). В прутках из латуни ЛЦ16К4 необходимо ограничивать содержание кремния до 3,5 %, свинца — до 0,1 %, чтобы предотвратить образование трещин.

Таблица 4.17. Электродные стержни с покрытиями для ручной дуговой сварки латуней

Марка		
латуни	электродной проволоки	покрытия
Л63; ЛО 62—1; Л68; ЛЦ16К4; ЛЦ40Мц3Ж	ЛЦ16К4 или ЛЦ40Мц3Ж	ЗТ или ОБ-5
Л63; ЛМц 58—2; Л90; ЛЖМц 59—1—1	БрКМц 3—1 или ЛЦ16К4	ЗТ
Л90; ЛМц58—2	БрАМц 9—2	Бр1/ЛИИВТ

Сварка и заварка дефектов литья латунных сплавов ведется на постоянном токе обратной полярности на параметрах режима, приведенных в табл. 4.18.

При сварке стыковых и угловых швов в положении, близком к вертикальному, первые слои целесообразно выполнять сверху вниз. При больших размерах удаленных дефектных участков на литье сначала наплавляются кромки, а уже потом весь участок. Если в изделии возникает деформация, проковывается каждый валик холодного шва, за исключением верхнего

слоя. Проковка выполняется пневматическим молотком с кругленным бойком до появления на металле шва вмятин от ударов. Механические свойства сварных швов после термической обработки — отжига уступают аналогичным характеристикам, полученным при других способах дуговой сварки, и в этом заключается причина его ограниченного использования.

Таблица 4.18. Ориентировочные параметры режима сварки латуней вручную покрытыми электродами (напряжение на дуге 18–20 В)

Тип шва и вид соединения	Толщина металла, мм	$d_{э}$, мм	$I_{св}$, А	Число наплавляемых слоев
Односторонний без разделки кромок на съемной подкладке	4	4–5	140–160	1
Двухсторонний без разделки кромок	10	5–6	220–240 ¹ 200–220 ²	3 + 2
Двухсторонний с двумя симметричными разделками обеих кромок	18	5–6	220–240 ¹ 200–220 ²	3 + 4

¹ Сварка корневого шва с другой стороны.

² Сварка других швов.

Ручная дуговая сварка латуни вольфрамовым электродом в аргоне применяется для стыковых соединений толщиной 1–10 мм, тавровых — 3–12 мм и соединений внахлестку 2–5 мм. Благодаря возможности локального введения теплоты в латунь образуется небольшая ванна жидкого металла и соответственно испарение цинка значительно уменьшается. Общие требования к подготовке кромок под сборку и сварку остаются такие же, что и для сварки меди. Для прихватки и сварки деталей из латуней Л90 и ЛМц58–2 применяются присадочные прутки из бронз БрКМц3–1 и БрАМц9–2, латуней Л63, Л68, ЛО62–1, ЛЖМц59–1–1, ЛС59–1 и др. — проволока БрКМц3–1, латуни ЛАМш77–2–0,05 — проволока БрАМц9–2, для сварки разнородных латуней Л63 с латунями ЛМц58–2 и ЛС59–1 — проволока БрКМц3–1.

При заварке дефектов литья в латуни ЛЦ40Мц3Ж1 и в латунях, содержащих алюминиевую составляющую, применяют

прутки или составы, аналогичные основному металлу, или из проволоки БрАЖМц10–3–1,5; в латунях ЛЦ40С и ЛЦ16К4 – проволоку БрКМц3–1, в латуни ЛЦ40Мц1,5 – проволоку БрАМц9–2 или БрКМц3–1.

Во всех случаях прихватку и сварку выполняют с присадочным металлом одного состава. Сварка многих латуней выполняется на постоянном токе прямой полярности. Но сварка алюминийсодержащих латуней или использование присадочных проволок с алюминием проводится на переменном токе, другие параметры режима приведены в табл. 4.19.

Таблица 4.19. Ориентировочные параметры режима сварки латуней вручную вольфрамовым электродом

Тип шва	Толщина металла, мм	$d_{Wэ}$, мм	$d_{прис}$, мм	$I_{св}$, А
Стыковой по отбортовке	1–2	3–4	1–1,5	120–130
Стыковой на подкладке	3–4	4–5	2–2,5	180–200
Угловой в тавровом соединении	3	4–5	3	220–240

Примечание. Напряжение на дуге 10–12 В; расход аргона 5–10 л/мин.

Параметры режима заварки дефектов литья зависят не только от толщины металла, но и от габаритов и конфигурации изделия. Техника сварки предусматривает выполнение корневых валиков с присадочной проволокой для уменьшения испарения цинка. При толщине металла более 5 мм следует подогревать детали до $T = 200–300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Прочность и другие показатели не хуже, чем у основного металла.

Механизированная дуговая сварка плавящимся электродом в защитных газах пригодна для всех видов сварных соединений толщиной 3–20 мм на постоянном токе обратной полярности. Параметры подготовки кромок под сварку такие же, как и при сварке меди. Остающиеся подкладки изготовляют из латуни той же марки, которая сваривается, съемные подкладки – флюсовые, керамические и графитовые. Для сварки латуней Л90 и Л63 рекомендуется проволока марки МНЖКТ5–1–0,2–0,2; для лату-

ней Л63, ЛМц58—2, ЛЦ40Мц1,5, ЛЦ40Мц3Ж1, ЛЦ30А5Мц2Ж1 целесообразно применять проволоку марки БрАМц9—2.

При *заварке дефектов литья* рекомендуется выполнять следующие правила:

- ◇ дефектные участки с трещинами, раковинами, зашлакованиями, порами и т.п. вырубаются до чистого металла, поверхности должны быть без острых углов и заусенцев;
- ◇ концы сквозных трещин перед вырубкой и разделкой засверливают насквозь сверлом диаметром 8—12 мм, несквозных — на 2—3 мм глубже дна трещины;
- ◇ после вырубки дефектных участков производят разделку кромок под углом не менее 35° к поверхности с плавным переходом к основанию;
- ◇ ремонтируемые поверхности зачищают до металлического блеска. При заварке дефектов на изделиях со стенкой толщиной 12—15 мм необходим предварительный подогрев до $T = 250\text{--}300^\circ\text{C}$.

При полуавтоматической сварке проволокой диаметром 2 мм сила сварочного тока составляет 180—325 А; при автоматической сварке проволокой диаметром 3 мм этот параметр лежит в пределах 240—350 А при напряжении дуги 21—24 В. Техника сварки такая же, как и при сварке меди, однако скорость сварки должна быть намного больше для предотвращения испарения и угара цинка. Чтобы предупредить коррозионное растрескивание, необходимо проведение термической обработки или проковывание швов.

Автоматическая сварка под флюсом выполняется для всех видов соединений толщиной 4—20 мм. За один проход можно сварить металл без разделки кромок толщиной до 12 мм, при больших толщинах выполняют V- или X-образную разделку. Зазоры в стыковых соединениях составляют 0—0,5 мм, в соединениях других видов 0—1 мм. Углы скоса кромок равняются $30 \pm 3^\circ$ на сторону, притупления 4—6 мм в зависимости от толщины металла. Применяются заходные и выходные планки размером 60×60 мм той же толщины, что и свариваемые детали. Прихватки выполняются теми же проволоками, что и сварка. При толщине латуни 4—10 мм длина прихваток составляет 25—35 мм и 30—40 мм при больших толщинах; расстояние между ними 400—500 мм. Для сварки используются комбинации

флюсов АН-20, ФЦ-10 с проволоками из бронз БрКМц3-1, БрОЦ4-3 и БрАМц9-2.

Вылет электрода выбирается в зависимости от его диаметра:

Диаметр проволоки, мм	2	3	4	5	6
Вылет, мм	20—30	30—35	35—40	40—50	45—55

Сварка ведется на постоянном токе обратной полярности на параметрах режима, приведенных в табл. 50, 4.20.

Таблица 4.20. Ориентировочные параметры режима автоматической сварки угловых швов тавровых соединений из латуни Л63 под флюсом АН-20 проволокой марки БрОЦ4-3 диаметром 2 мм

Катет шва, мм	$I_{св}, А$	$V_{св}, м/ч$	Катет шва, мм	$I_{св}, А$	$V_{св}, м/ч$
6—7	300—350	28—30	10—11	350—400	20—22
8—9	300—350	24—26	12—13	350—400	18—20

Примечание. Напряжение на дуге 30—33 В.

При толщине металла 4—6 мм стыковые швы свариваются без разделки кромок односторонними швами на флюсовой подушке или двухсторонними «на весу». При толщинах 8—12 мм более целесообразна сварка без разделки кромок двухсторонними швами «на весу». При толщинах 14—20 мм лучше вести сварку с двумя симметричными разделками двух кромок и двухсторонними швами «на весу», причем во всех случаях первый шов выполняется «на весу».

Сварку тавровых швов выполняют без разделки кромок «в лодочку». После сварки проводится термическая обработка по ранее определенному режиму.

Электрическая контактная сварка латуней вследствие меньшего электрического сопротивления, чем у сталей, требует больших сварочных токов и мощности сварочных машин соответственно на 30 и 50 %.

Параметры режима точечной сварки латуни Л63 — наиболее распространенного конструкционного сплава меди с цинком — приведены в табл. 20, 1.24, 4.21.

Таблица 4.21. Ориентировочные параметры режима точечной сварки латуни Л63

Толщина, мм	Радиус поверхности электрода, мм	Усилие на электродах, даН	Ток сварки, кА	Время сварки, с	Потребляемая мощность, кВт
0,5	50	130	15	0,1	68
1,0	50	180	18	0,2	95
1,5	70	260	27	0,2	167
3,0	150	400	39	0,35	290

Параметры режима стыковой сварки латуни сопротивлением и оплавлением приведены в табл. 1.33, 1.34, 1.36.

Сварка в твердой фазе трением выполняется как традиционным способом, так и трением с перемешиванием, когда процесс ведется на параметрах режима: $n = 900-1250$ об/мин, $\alpha = 2-3^\circ$, $V_{св} = 50-70$ мм/мин. Рабочий инструмент выполнен из жаропрочного сплава на основе вольфрама, имеет простую форму с диаметром заплечика 25 мм. Твердость сварного шва, сваренного без дефектов, на 15–20 % выше, чем у основного металла.

Диффузионная сварка латуней затруднена вследствие испарения цинка, когда имеют место вспучивание поверхности, образование пор и выбросы из них продуктов реакции взаимодействия цинка с медью при температуре на 150°C ниже температуры плавления сплава Л63. Поэтому этот способ сварки возможен только в защитной атмосфере при ее давлении, на 10–20 кПа большем парциального давления пара цинка.

4.8. Сварка алюминиевых бронз

Изделия из алюминиевых бронз изготавливаются как в деформируемом виде, так и в литом состоянии. Эти бронзы обладают высокими механическими, антикоррозионными и антифрикционными свойствами.

Алюминиевые бронзы изготавливаются в соответствии с ГОСТ 18175–78 «Бронзы безоловянистые, обрабатываемые давлением» и маркируются так: БрА5 (4–6 % Al, остаток Cu),

БрА7 (6–8 % Al, остаток Cu), БрАМц9–2 (8,0–10,0 % Al, 1,5–2,5 % Mn, остаток Cu), БрАЖМц10–3–1,5 (9,0–11,0 % Al, 2,0–4,0 % Fe, 1,0–2,0 % Mn, остаток Cu). Из них получают ленты, полосы, поковки, трубы, прутки. Гребные винты, арматуру, корпуса теплообменных аппаратов и другие фасонные изделия производят из литейных бронз по ГОСТ 493–79 «Бронзы безоловянистые литейные», которые маркируются так: БрА9Мц2Л (8,0–9,5 % Al, 1,5–2,5 % Mn, остаток Cu), БрА9Ж3Л (8,0–10,5 % Al, 2,0–4,0 % Fe, остаток Cu), БрА9Ж4Н4Мц1 (8,8–10,0 % Al, 4,0–5,0 % Fe, 0,5–1,2 % Mn, 4,0–5,0 % Ni, остаток Cu).

Двойные алюминиевые бронзы имеют однофазную α -структуру, склонны к газонасыщению в жидком состоянии и образованию крупнокристаллической столбчатой структуры. Легирование их марганцем, железом и никелем существенно уменьшает эти недостатки.

Наличие оксидной пленки Al_2O_3 (ее толщина может достигать 0,5–1,0 мм на поверхности литых деталей) приводит к засорению сварочной ванны, способствует пористости сварных швов, и для борьбы с ней предпринимают такие же меры, как и при сварке алюминия.

Все алюминиевые бронзы, за исключением алюминиево-марганцевых, имеют провал пластичности в области температур 400–500 °С, что приводит к образованию трещин, особенно при сварке литейных сплавов, менее пластичных, чем деформируемые. Это еще больше проявляется в условиях жесткого закрепления. В данном интервале температур надо обеспечивать повышенную скорость охлаждения, а при многопроходных швах температура предыдущих валиков перед наложением последующих должна быть ниже 200 °С. При необходимости предварительного подогрева температура не должна превышать 200 °С.

При сварке сложнолегированных высокопрочных бронз трудно использовать механизированные способы сварки в защитных газах из-за невозможности изготовить волочением проволоку того же состава. Для сварки под слоем флюса применяют проволоку из бронзы БрАМц9–2 в сочетании с керамическим флюсом, но вследствие плохой отделимости шлаковой корки в сварном шве оказываются шлаковые включения,

что недопустимо при изготовлении изделий особо ответственного назначения. Эта проблема решается путем использования специальной композитной проволоки, которая изготавливается путем совместного волочения медной ленты (оболочки) вместе с алюминиевой, стальной, никелевой и марганцевой проволоками. Изменяя размеры ленты и составляющих проволок, можно получить любой состав не только алюминиевой бронзы, но и любого медно-никелевого сплава (табл. 4.22).

Таблица 4.22. Составляющие материалы и расчетный состав композитных проволок для сварки и наплавки медных сплавов

Марка сплава	Составляющие сердечника проволоки	Расчетный состав легирующих элементов в проволоке, %
БрА12	Al	12—13
БрА14	Al	13—14
БрАН12—4	Al; Ni	12—13; 4
БрАН14—3	Al; Ni	13—14; 3
БрАНТ12—4—1	Al; Ni; Ti	11—12; 4; 0,6
БрАНЖ10—2—1	Al; Ni; Fe	10—11; 2; 0,8
БрАНЖ12—4—0,5	Al; нихром; Fe	12—13; 4; 0,6; 0,8
БрАНМцЖ8,5—4—4—1	Al; Ni; марганец; Fe	8—9; 4; 4; 0,8
МН50	Ni	50—52

Примечание. Во всех случаях оболочка проволоки из медной ленты.

Принципы, положенные в основу технологии волочения таких проволок, позволяют изготавливать присадочный металл диаметром 2—6 мм. Преимуществом такой конструкции проволоки является одновременное плавление всех составляющих компонентов, когда уже на стадии капли образуется сплав заданного состава. В сочетании с защитным газом можно получить многослойные швы без шлаковых включений.

При сварке сложнелегированной бронзы БрМцАЖН12—8—3—2 в случае ее быстрого охлаждения со скоростью 50—60 °С/с в ней фиксируется высокотемпературная β -фаза и выделяется игольчатая α -фаза. Чтобы этого не происходило, после сварки данной бронзы нужно обеспечивать ее медленное охлаждение со скоростью не более 8—10 °С/с, а для снятия остаточных напряже-

ний в изделии его надо подвергать отжигу при температуре 550 °С с выдержкой 3–5 ч и охлаждению с печью. Аналогичной термической обработке нужно подвергать бронзы БрА9Ж4Н4 и БрА7Мц14Ж3Н2, чтобы после сварки у них не снизились усталостные показатели вследствие остаточных напряжений в зоне термического влияния. Изделия сложной формы и с повышенной жесткостью нужно нагревать со скоростью не более 120 °С/ч, а охлаждать со скоростью не более 50 °С/ч.

Газовая сварка алюминиевых бронз предполагает применение флюсов, способствующих разрушению оксидной пленки Al_2O_3 , разных составов: N1 (30 % NaCl, 45 % KCl, 15 % LiCl, 7 % KF, 3 % кислый фосфат натрия), N2 (45 % NaCl, 30 % KCl, 10 % LiCl, 15 % KF), N3 (25 % NaCl, 50 % KCl, 14 % LiCl, 8 % NaF). В качестве присадки используются стержни того же состава, что и основной металл. Процесс сварки ведется нормальным пламенем мощностью 100–150 л/ч на 1 мм толщины свариваемого металла при условии предварительного подогрева. В случае его отсутствия мощность повышается до 125–175 л/ч.

Ручная дуговая сварка графитовым электродом на постоянном токе обратной полярности или на переменном токе применяется в основном для заварки дефектов литья, а также для сварки конструкций неотвественного назначения при толщине металла от 3 до 20 мм. Стыковые соединения листов толщиной до 5 мм выполняются без разделки кромок за один проход, листы толщиной до 8 мм свариваются двухсторонними швами также без разделки кромок, а листы толщиной 8–20 мм требуют V-образной разделки под углом 70–90°. Дефекты литья, подлежащие устранению, разделяются до чистого металла для возможности удобного доступа электрода и присадки. Стенки должны быть пологими, а поверхность без острых углов и заусенцев. Угол между стенками разделанных дефектов составляет 80–90°, а основание разделки выполняется с плавным переходом с радиусом 3–5 мм от стенки к притуплению 2–3 мм в корне разделки. Поверхности зачищают до металлического блеска и обезжиривают ацетоном. Сварка ведется на постоянном токе обратной полярности или на переменном токе длинной дугой 20–25 мм и напряжением 40–45 В; другие параметры режима приведены в табл. 4.23.

Таблица 4.23. Ориентировочные параметры режима сварки алюминиевых бронз графитовым электродом

Толщина металла, мм	d_3 , мм	$d_{\text{прис}}$, мм	$I_{\text{св}}$, А
4–6	4	3–4	60–80
6–8	6	4–5	110–130
8–10	8	5–6	190–250
10–15	10	6–8	280–350

В качестве присадки используются литые прутки того же состава, на их поверхность наносится покрытие толщиной 0,2–0,4 мм из фтористых и хлористых солей щелочно-земельных металлов различных составов (табл. 4.24). Перед сваркой металла толщиной более 10–12 мм требуется предварительный подогрев до 150–300 °С: чем толще стенка изделия, тем выше температура подогрева. При сварке коротких швов до 300 мм подогрев выполняется только для первого валика.

Таблица 4.24. Состав флюсов для сварки алюминиевых бронз графитовым электродом

Номер флюса	Содержание компонентов, % (по массе)						
	Na_3AlF_6	KCl	NaCl	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ (плавлен.)	Древесный уголь	NaF	BaCl_2
1	—	45	20	—	—	15	20
2	35	50	12,5	—	2,5	—	—
3	25	35	10	28	2	—	—
4	80	—	—	—	—	20	—
5	—	22	22	56	—	—	—

Наложение первого шва осуществляется на подкладке — временной или остающейся. Чтобы поверхности сварочной ванны были очищены от оксидов и шлаков, в процессе сварки разогретым концом присадки совершают манипуляции. Перед нанесением каждого последующего шва предыдущий тщательно зачищают от шлака, иначе в последующих швах могут образоваться поры. Лучше всего для этого проводить механическую обработку, так чтобы поверхность предыдущего валика была плоской или вогнутой. При многопроходной сварке желатель-

по накладывать узкие валики с хорошим смачиванием основного металла жидкой ванной и плавным переходом каждого валика к основному металлу, что способствует получению швов без непроваров и шлаковых включений.

Ручная дуговая сварка покрытым электродом ведется на постоянном токе обратной полярности и выполняется только в нижнем или полувертикальном положении. Металл толщиной до 5 мм сваривается без разделки кромок; при толщинах до 14–16 мм следует выполнять V-образную подготовку кромок с углом раскрытия 90° и притуплением 1–2 мм; при больших толщинах выполняется X-образная разделка с теми же параметрами. Подготовка дефектных мест, очистка кромок и сборка под сварку выполняются, как при сварке графитовым электродом.

Получение наплавленного металла заданного сплава обеспечивается за счет литых электродных стержней и обычного покрытия или за счет использования бронзовой проволоки марки БрАМц9–2 и легирующего покрытия (табл. 4.25). Перед использованием электроды прокаливают 2 ч при $T = 350\text{--}400^\circ\text{C}$. Печь разогревают вместе с электродами, а охлаждают их до $T = 50\text{--}100^\circ\text{C}$ также вместе с печью. Сварка ведется на постоянном токе обратной полярности на параметрах режима, приведенных в табл. 4.26.

Таблица 4.25. Выбор состава электродного стержня и марки покрытия для сварки алюминиевых бронз

Состав электродного стержня	Марка покрытия	Тип наплавленного металла
БрАМц9–2	ЛПИ АБ-1	БрАМц9–2
БрАЖМц10–3–1,5	ЛПИ АБ-1	БрАЖМц10–3–1,5
БрАЖНМц8,5–4–5–1,5	ЛПИ АБ-1	БрАЖНМц8,5–4–5–1,5
БрАЖН10–4–4	ЛПИ АБ-1	БрАЖН10–4–4
БрАМцЖН8–10–3–2	ЛПИ-48-МАБ-1	БрАМцЖН8–10–3–2
БрАЖМц10–3–1,5	ЛПИ-ИЖ-АБ-7	БрАЖНМц7–2,5–1,5–9
БрАМц9–2	ЛПИ-ЛКЗ-АБ-4	БрАНМцЖ8–3–4–1,5
БрАЖМц10–3–1,5	ЛПИ-48-АБ-5	БрАЖНМц8,5–4–4–1,5
Композитный стержень любого состава	ЗМИ-1 (58 % Na_3AlF_6 , 38 % NaF , графит 4 %)	Любого состава

Таблица 4.26. Ориентировочные параметры режима ручной дуговой сварки стыковых соединений алюминиевых бронз покрытыми электродами

Тип шва и вид соединения	Толщина металла, мм	d_3 , мм	$I_{св}$, А, для номера прохода	Число проходов
Односторонний без разделки кромок на съемной подкладке	4	5	180–190	1
То же с V-образной разделкой кромок	10	5	190–210, 1-й 180–190 последующие	5
Двухсторонний с X-образной разделкой кромок	20	5	190–210 первые пять	10
		6	210–230 последующие	

Скорость плавления бронзовых электродов в 1,5 раза выше, чем стальных, поэтому нужно увеличивать скорость сварки. При сварке с поперечными колебаниями необходимы мгновенные задержки на кромках соединения, особенно на U- и U-образных разделках, тщательная зачистка валиков от шлака (лучше всего поверхность валика обработать механическим способом на глубину 0,5 мм).

Ручная дуговая сварка вольфрамовым электродом ведется на переменном токе, выполняется для всех типов сварных соединений во всех пространственных положениях как при заварке небольших дефектов литья, так и для наплавки тонких слоев бронзы с небольшим проплавлением основного металла.

Стыковые односторонние швы без разделки кромок с минимальными зазорами можно выполнять при толщинах до 5 мм; двухсторонними швами можно сваривать металл толщиной 6–8 мм; при толщинах до 12 мм выполняют V-образную разделку, а для толщин больше 12 мм – X-образную разделку. Угол раскрытия составляет 85–90° с притуплением в стыке не более 2 мм. Прихватку и сварку первого прохода выполняют с помощью менее легированных присадочных проволок, чем основной металл, например из бронзы БрАМц9–2 или марки ОК Autrod 19.40 (7,9 % Al, 0,1 % Mn, 0,05 % Si). Однако для дальнейших проходов присадка по составу должна соответствовать

основному металлу. Высота прихваток не должна превышать 3–6 мм и по сечению быть не больше 0,5–0,25 сечения шва; ее длина — 10–20 мм, а расстояние между прихватками 50–100 мм. Сила сварочного тока прихватки должна быть на 20–30 % больше силы тока, необходимого для сварки конструкции. Прихваточные швы должны иметь плоскую или вогнутую форму. При толщине металла более 10–12 мм сварка ведется с предварительным подогревом $T = 150\text{--}200\text{ }^{\circ}\text{C}$, на переменном токе и на параметрах режима, приведенных в табл. 51.

Дугу возбуждают на графитовой пластине, расположенной рядом с началом шва, после чего дуга переносится на основной металл. Горелка и присадочный пруток располагаются в плоскости, перпендикулярной к поверхности свариваемых деталей, которая проходит через ось разделки. Угол наклона оси горелки к оси шва составляет $70\text{--}90^{\circ}$, приближаясь к 90° для металла больших толщин. Горелку перемещают углом вперед. Присадочный пруток подается к оси шва под углом наклона $10\text{--}15^{\circ}$ так, чтобы он попадал в ореол дуги на краю сварочной ванны и все время находился в зоне газовой защиты. Его попадание в столб дуги приводит к разбрызгиванию сварочной ванны и загрязнению торца вольфрамового электрода. При сварке металла толщиной до 4–5 мм пруток вводится в ванну возвратно-поступательными движениями вдоль оси шва; при сварке металла больших толщин пруток выполняют серповидные поступательно-колебательные движения поперек сварочной ванны. Расход защитного газа должен быть достаточным, но не чрезмерным, чтобы не было охлаждения сварочной ванны и связанного с этим блуждания дуги по поверхности изделия. При многослойной сварке накладывают валики плоской или вогнутой формы для обеспечения межваликового сплавления. Если образуются валики выпуклой формы, их нужно механически обработать до желаемой формы.

Механизированная дуговая сварка плавящимся электродом в среде защитных газов ведется на постоянном токе обратной полярности и применяется при изготовлении изделий со стенкой любой толщины, а также при ремонтных работах.

При толщине металла до 6–8 мм возможна односторонняя сварка с зазором в стыке 0–1 мм; при толщинах 8–10 мм и воз-

возможности кантования изделия выполняется двухсторонняя сварка без разделки кромок и с зазором до 2 мм. При толщинах до 20–22 мм выполняется V-образная разделка с углом раскрытия кромок 60° и 70° для больших толщин. При толщине изделия более 20–22 мм выполняется X-образная разделка с углом раскрытия кромок 70° или U-образная. При всех видах разделки притупление составляет 4–6 мм.

Разделку дефектов литья нужно выполнять с учетом удобства ведения процесса заварки. Дефектные места зачищаются до здорового металла с обязательным плавным выводом разделки на поверхность без резких переходов, углов, острых кромок и заусенцев. Угол суммарного раскрытия кромок не более 40° при U-образной разделке и 70° при V-образной.

Свариваемые поверхности очищают и обезжиривают уайт-спиритом, ацетоном, а электродную проволоку подвергают химическому травлению или электролитическому полированию для полного удаления адсорбированной влаги. Сварочная проволока подвергается химической обработке в растворах различных составов.

1. Обезжиривание в растворе: NaOH (15 г/л), тринатрийфосфат (50 г/л), Na_2CO_3 (50 г/л), силикат натрия (5 г/л); промывание в технической воде, травление 1–4 мин в растворе серной кислоты (80–120 г/л); промывание в технической воде; осветление 5–10 с в растворе: хромовый ангидрид (80–150 г/л), серная кислота (25–34 г/л), NaCl (1, 5–2,5 г/л); промывание в технической воде; сушка.
2. Травление в растворе: ангидрид хромовый технический (80–100 г/л), кислота серная техническая (3–4 г/л) при температуре 18–20 °С в течение 25–30 мин; промывание в проточной воде; удаление продуктов травления щеткой; сушка сжатым воздухом.
3. Травление в ванне состава: HNO_3 концентрированная (250 г/л), H_2SO_4 концентрированная (700 г/л), HCl концентрированная (40 г/л) в течение 2–3 мин при температуре 18–25 °С; промывание в проточной воде; сушка на открытом воздухе при $T = 20\text{--}25\text{ }^\circ\text{C}$.

Алюминиевые бронзы жидкотекучие, поэтому при наложении первого валика необходимо использовать съемные или остающиеся подкладки. Если их применение невозможно, нуж-

но предусмотреть механическую расчистку корня шва для удаления плен оксидов и несплавлений.

Прихватку следует осуществлять на режимах и с применением той же проволоки, что и при сварке (табл. 52, 4.27). При сварке длина дуги должна быть в пределах 3–5 мм во избежание пористости. Процесс ведут на возможно большей скорости отдельными валиками площадью сечения 20–40 мм², каждый предыдущий валик перед наложением последующего зачищают и шлифуют для получения вогнутой или плоской поверхности; каждый последующий валик должен перекрывать предыдущий не более чем на $\frac{1}{3}$.

Особенно перспективно применение этого способа при заварке дефектов литья, когда в качестве присадочной проволоки используется композитная проволока аналогичного состава, а отсутствие необходимости удаления шлаковой корки обеспечивает хорошее качество и высокую производительность ремонтных работ.

Таблица 4.27. Ориентировочные параметры режима полуавтоматической сварки легированных алюминиевых бронз в среде аргона

Тип бронзы	Марка присадочной проволоки	d_3 , мм	$I_{св}$, А	Q_{Ar} , л/мин
Алюминиево-никелевая	БрАЖНМц8,5–4–5–1,5	1,6–2,0	260–310 310–360	14–16 15–17
Марганцево-алюминиевая	БрМцАЖН12–8–3–2	1,6–2,0	250–300 300–350	14–16 15–17
БрАНМцЖ8,5–4–4–1,5	БрАНМцЖ8–3–4–1К (композитная)	2,8	360–380	15–16

Расстояние между срезом сопла горелки и свариваемой поверхностью должно быть минимальным, а струя газа довольно жесткой, что обеспечивается соответствующими формой и диаметром сопла горелки (16–20 мм), а также расходом газа. Угол наклона горелки при левом способе ее ведения должен составлять 80° от вертикали в сторону, обратную направлению сварки.

При сварке алюминиево-никелевых бронз, которые имеют провал пластичности, после каждого прохода нужно делать перерыв для охлаждения валика до $T = 150^\circ\text{C}$.

Эффективная заварка дефектов литья из алюминиевых бронз обеспечивается при полуавтоматическом способе в среде аргона плавящейся композитной электродной проволокой соответствующего состава диаметром 2,8 мм на параметрах режима: $I_{св} = 350-380$ А, $U_d = 24-26$ В, $Q_{Ar} = 16$ л/мин, вылет электрода 25 мм. При этом достигаются высокая производительность процесса, полное отсутствие шлаковых включений в наплавленном металле.

Автоматическая сварка под флюсом ведется на постоянном токе обратной полярности и применяется для сварки металла толщиной 5–60 мм. При толщине металла 5–15 мм сварка ведется без разделки кромок двухсторонними швами; возможна и односторонняя сварка на флюсовой подушке, съемных или остающихся подкладках. Для толщин 20–22 мм выполняется V-образная разделка с углом раскрытия 60–70° и притуплением 4–6 мм. При больших толщинах и возможности двухсторонних швов выполняют X-образную разделку кромок. При толщинах более 40 мм и невозможности двухсторонней сварки целесообразно применять одностороннюю разделку с большим скосом кромок. Угол разделки в корне шва должен быть не менее 70° на толщине сечения 20–25 мм и 30–40° на оставшейся толщине сечения кромок стыка. Проволока подготавливается по приведенным выше схемам.

Сборка под сварку выполняется вручную вольфрамовым электродом с присадкой того же состава, что и при сварке.

Для сварки алюминиевых бронз нужно использовать проволоки того же состава, что и основной металл, а также специальные керамические флюсы, которые не окисляют легирующие компоненты и лучше выводят из сварочной ванны включения оксида алюминия (табл. 53). Стандартные плавные флюсы марок АН-20, АН-42 и др. не обеспечивают получение равноценных сварных соединений, хотя для некоторых конструкций их можно применять в сочетании с проволоками марок БрАМц9–2, БрАЖ9–4 (табл. 4.28).

Для лучшего газоудаления сварка ведется по слою флюса высотой 25–30 мм. Сварку высоколегированных алюминиевых бронз рекомендуется выполнять с применением электродных материалов, представленных в табл. 54, которые обеспечивают получение равнопрочных сварных соединений.

Таблица 4.28. Ориентировочные параметры режима автоматической сварки под флюсом АН-20 алюминиевых бронз марок БрАМц9-2, БрАЖ9-4, БрАЖМц10-3-1,5 проволокой марки БрАМц9-2 диаметром 5 мм на постоянном токе обратной полярности

Подготовка кромок	Толщина металла, мм	$I_{св}$, А	$U_{св}$, В	$V_{св}$, м/ч	Примечание
Без разделки	10	450–470	35–36	25	Двухсторонняя сварка
V-образная разделка	15	550–570	35–36	25	1-й проход
		650–670	36–38	20	2-й проход
		650–670	36–38	25	Подварочный шов
X-образная разделка	25	750–770	36–38	25	Первые проходы
		800–820	36–38	20	Вторые (внешние) проходы

Наплавку алюминиевых бронз применяют для придания специальных свойств поверхностному слою многих деталей машин. При этом используются сплавы меди с 10–12 % алюминия; при переходе из жидкого состояния в твердое они имеют структуру β -фазы, которая при замедленном охлаждении после 350 °С распадается на $(\alpha + \gamma_2)$ -фазу. Однако в условиях наплавки высокотемпературная β -фаза остается нераспавшейся вследствие быстрого охлаждения и находится в метастабильном состоянии. При микроударном воздействии она способна к бездиффузионному превращению в мартенситоподобную β' -фазу, реализуя таким образом процесс самоупрочнения. Благодаря этому свойству наплавленной высокоалюминиевой бронзы можно значительно повысить износостойкость поверхностного слоя и существенно увеличить срок службы деталей машин (латунных гребных винтов, подверженных кавитационной эрозии, узлов трения в роторных питателях целлюлозно-бумажного производства и т.д.). Например, латунные гребные винты быстроходных судов на подводных крыльях работают в условиях кавитационной эрозии, в результате чего на их лопастях появляются специфические повреждения, выводящие их из строя. Винты изготавливаются из латуней марок ЛЦ40МцЗЖ и ЛЦ24А5Мц2Ж2, они имеют 5–6 лопастей сложной конфигурации и переменного сечения, что значительно усложняет технологию и технику проведения наплавочных работ.

Удаление дефектного металла осуществляется механическим способом. Подготовленный к наплавке винт устанавливается на специальном манипуляторе, обеспечивающем возможность выполнения наплавки в нижнем положении. Перед наплавкой винт нагревается пламенем газовой горелки до $T = 300\text{--}350\text{ }^{\circ}\text{C}$. Хотя это и увеличивает деформации лопастей, но позволяет избежать образования трещин в наплавленном металле.

Место наплавки имеет скругленную форму разной степени глубины, поэтому в зависимости от количества необходимого наплавленного металла процесс выполняется на одной лопасти за один прием при площади до 50 см^2 или за несколько приемов вразброс при большей площади. Наплавка ведется в среде аргона вольфрамовым электродом на переменном токе на параметрах режима: $d_{\text{вз}} = 6\text{ мм}$, $I_{\text{св}} = 290\text{--}360\text{ А}$, $U_{\text{д}} = 27\text{--}29\text{ В}$, $d_{\text{прис}} = 4\text{ мм}$ (композитная проволока марки БрАН14–3), расход аргона 18–20 л/мин.

Первый валик накладывается посередине подготовленного места, другие по схеме, данной на рис. 4.4. В этом случае наплавка ведется вразброс: второй слой накладывается через некоторое время во избежание перегрева лопасти и значительной деформации. После наложения каждый валик тщательно зачищается металлической щеткой от оксидной пленки и брызг металла. Техника сварки обеспечивает минимальное проплавление основного металла и получение расчетного состава поверхностного металла при небольшой деформации лопастей. После механической обработки наплавленных участков с помощью шагового угольника проверяется геометрия лопастей и при необходимости они подвергаются правке с подогревом газовой горелкой. Благодаря новым электродным материалам, технологии и технике сварки стойкость гребных винтов повысилась в 3–5 раз по сравнению со стойкостью основного металла.

Алюминиевой бронзой наплавляются также стальные поверхности узлов трения, например кольца и ребра ротора питателя низкого давления установок непрерывной варки целлюлозы (рис. 4.5). Питатель подает технологическую щепу в пропарочную камеру с давлением 2 атм, одновременно отделяя ее от окружающего воздуха с обычным давлением, т.е. вы-

полняет роль постоянно вращающегося конусного пробкового крана, притертого к коническому корпусу из нержавеющей стали. Этот аппарат работает в условиях полусухого трения в коррозионно-абразивной среде, поэтому наплавленный слой алюминиевой бронзы должен обладать высокой твердостью в сочетании с коррозионной стойкостью и удовлетворительными антифрикционными свойствами. Этим требованиям удовлетворяет наплавленный металл типа бронзы БрАН12-3, который наносится в 2-3 слоя на поверхности ребер и колец ротора, изготовленного из стали Ст3, либо вручную покрытыми электродами, либо автоматической наплавкой плавящимся электродом в аргоне с использованием композитной проволоки (табл. 54). Положительные результаты достигаются при наплавке бронзы БрАМц9-2 расщепленной дугой с поперечными колебаниями под флюсом АН-26П (табл. 4.29). При этом можно значительно снизить содержание железа в наплавленном металле и повысить производительность в 2-4 раза по сравнению с использованием одной проволоки без колебаний.

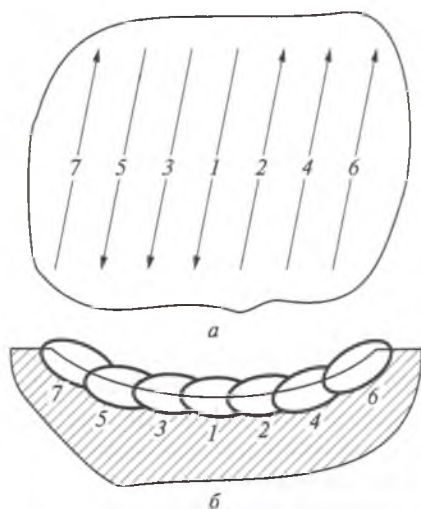


Рис. 4.4. Последовательность наложения валиков при наплавке поврежденного места первым слоем:

а — вид сверху; б — в поперечном сечении

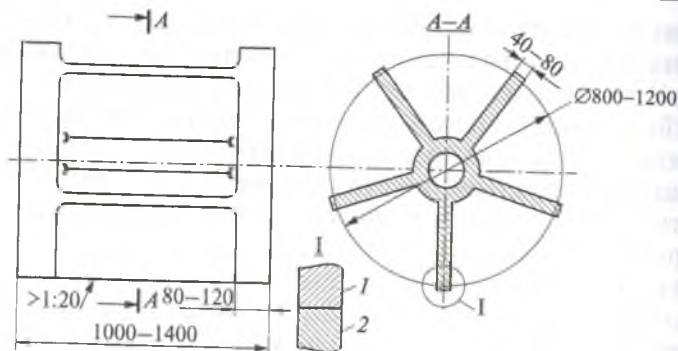


Рис. 4.5. Конструкция ротора питателя низкого давления:

1 — стальная стенка кармана; 2 — рабочий слой из высокоалюминиевой бронзы

Таблица 4.29. Ориентировочные параметры режима наплавки алюминиевых бронз на сталь на постоянном токе обратной полярности

Способ наплавки	Марка бронзы	d_3 , мм	$I_{св}$, А	U_d , В	Q_{Ag} , л/мин	$V_{св}$, м/ч
Ручная дуговая покрытым электродом	БрАН14-3	4-5	170-240	28-30	—	—
Механизированная плавящимся электродом в арго-не	БрАН12-3	2,8	240-260	24-25	16	25
	БрАМц9-2	2	215-230	22-23	10-12	—
Автоматическая под флюсом АН-26П расщепленной дугой ¹	БрАМц9-2	4	430-450	38-40	—	15
Плазменная токоведущей проволокой ²		2	230-250	36-38	15-17	12
			320-350	42-45		

¹ Постоянный ток прямой полярности.² В числителе — 1-й проход, в знаменателе — 2-й проход.

Плазменная наплавка бронзы на параметрах режима, приведенных в табл. 4.29, выполняется при наложении первого вали-

ка с предварительным подогревом стали толщиной 15–25 мм до $T = 100\text{--}150\text{ }^{\circ}\text{C}$; сварочная проволока также подогревается на вылете электрода длиной 80 мм между двумя трубчатыми токоподводами. Расход плазмобразующего газа составляет 5–6 л/мин.

Плазменная наплавка с применением токоведущей проволоки обеспечивает минимальное проплавление основного металла при высоком качестве наплавленного металла. Выбор параметров режима зависит от толщины стали (и очень мало от ее марки, диаметра и химического состава присадочной проволоки) и других характеристик, приведенных в табл. 55, 56.

Наплавка осуществляется следующим образом: 1) зажигается дуга между вольфрамовым электродом и соплом; 2) с появлением плазменной струи из сопла-канала головка некоторое время работает на холостом ходу до стойкого горения дуги; 3) включается подача присадочной проволоки и возбуждается основная дуга между вольфрамовым электродом и проволокой; 4) начинается плавление присадки и капли расплавленного металла переходят на поверхность изделия с образованием сварочной ванны; 5) перегретый металл растекается по поверхности изделия; 6) включается перемещение автомата или изделия при неподвижном автомате.

Таким образом, плавление основного металла и сплавление его с наплавляемым осуществляется за счет теплоты перегретых в дуге капель электродного металла и частично факела плазменной струи.

Поперечные колебания головки плазмотрона позволяют осуществлять наплавку валиков с плавным переходом от основного металла к наплавленному, что обеспечивает лучшие условия для сплавления валиков и получения широкого слоя. Амплитуда колебаний 10–50 мм зависит от ширины валика, а частота колебаний составляет 20–40 в 1 мин. Каждый последующий валик должен перекрывать предыдущий на 8–12 мм. При многослойной наплавке требуется тщательная зачистка предыдущих валиков от оксидов, брызг и других загрязнений. При наплавке тел вращения процесс ведется по винтовой линии, что позволяет наплавлять детали начиная с 30–40 мм и более. Амплитуда колебаний головки плазмотрона равна 25–30 мм. Плазменная головка смещается на 3–5 мм от осевой

линии против вращения деталей диаметром 30–100 мм; при больших диаметрах это делать не обязательно. Прочность сцепления наплавленного металла с основным находится на уровне прочности наплавленного или даже выше.

Электрическая контактная сварка алюминиевых бронз выполняется на параметрах режима, близких тем, на которых сваривается медь, но ее необходимо корректировать в соответствии с данными, приведенными в табл. 21, 1.32 и 1.33.

4.9. Сварка оловянистых бронз

Оловянистые бронзы получают в деформируемом и литом состоянии и применяют для облицовки судовых гребных валов, подшипников скольжения и т.п.

В соответствии с ГОСТ 5017–74 «Бронзы оловянистые, обрабатываемые давлением» маркируются следующим образом: БрОФ8,0–0,3 (7,5–8,5 % Sn; 0,25–0,35 % P; 0,1–0,2 % Ni; остаток Cu), БрОЦ4–3 (3,5–4,0 % Sn; 2,7–3,3 % Zn; остаток Cu), БрОЦС4–4–4 (3,0–5,0 % Sn; 3,0–5,0 % Zn; 3,5–4,5 % Pb; остаток Cu).

Для изготовления фасонных изделий применяются бронзы согласно ГОСТ 613–79 «Бронзы оловянистые литейные», которые маркируются так: БрОЗЦ12С5 (2,0–3,5 % Sn; 8,0–15,0 % Zn; 3,0–6,0 % Pb; остаток Cu), БрО8Ц4 (7,0–9,0 % Sn; 4,0–6,0 % Zn; остаток Cu).

Сварку оловянистых бронз выполняют при изготовлении облицовок судовых гребных валов, причем отдельные их части, которые получены за счет центробежного литья, свариваются частично вне вала, а частично на самом валу. Кроме того, применяют заварку дефектов литья из этих бронз.

Теплопроводность оловянистых бронз существенно ниже, чем у меди, поэтому нет необходимости в предварительном и сопутствующем подогреве, но все же его используют, чтобы избежать трещин вследствие низкой пластичности бронзы при повышенных температурах, особенно при заварке дефектов литья сложной конфигурации и значительном перепаде толщин. Подогрев нужно осуществлять осторожно, с перерывами

для выравнивания температур, так как при перегреве излишнее олово на границах кристаллов расплавляется, нарушая связь между ними, металл разупрочняется и отливка может разрушиться под действием собственной массы.

При сварке возможна ликвация олова в связи с большим температурным интервалом кристаллизации, что влечет за собой образование горячих трещин. Чем больше содержание олова в сплаве и выше скорость охлаждения, тем больше химическая неоднородность. Мерами борьбы с этим выступают сварка на минимальной погонной энергии с перерывами для выравнивания температуры, отжиг заготовок, промежуточный отжиг наполовину сваренного изделия и финишный отжиг, применение сварочных материалов с меньшим содержанием олова, когда каждый последующий валик наносится после охлаждения предыдущего до 100°C . Часто выполняется проковка свариваемых кромок, а потом наплавка и проковка уже наплавленных валиков, что снижает вероятность образования трещин в околошовной зоне и шве. Последующий отжиг полностью устраняет структурную неоднородность в шве.

Трещины в зоне термического влияния бронзы БрОЦ10–2 образуются вследствие диффузии водорода из основного металла к линии сплавления и сегрегации в ней легкоплавких примесей свинца и висмута. Предварительный отжиг этой бронзы при температуре 600°C в течение 5 ч устраняет склонность к хрупкости за счет уменьшения начальной концентрации в основном металле и исключает сегрегацию вредных примесей; содержание последних не более 0,05 %.

Промежуточный отжиг этой бронзы при $T = 500^{\circ}\text{C}$ в течение 4 ч при охлаждении после каждого прохода до $T = 100^{\circ}\text{C}$ и сварке на погонной энергии 800–1200 кДж·ч/м способствует существенному снижению пластической деформации вблизи границы сплавления и препятствует образованию горячих трещин при последующей сварке. Содержание свинца в бронзах БрОЦ10–2 и БрОЦ8–4 должно быть не более 0,05 %, а содержание олова — не более 8–10 %. Отжиг полностью сваренного изделия из бронзы БрОЦ10–2 при 650°C в течение 5 ч значительно снижает химическую неоднородность и улучшает механические свойства сплава и зоны термического влияния.

рукций рекомендуется производить отжиг при $T = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ и дальнейшую закалку при $T = 600\text{--}650\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Сварка вручную графитовым и вольфрамовым, а также покрытым электродом выполняется с присадочными материалами различных типов. Так, сварка неплавящимися электродами ведется на постоянном токе прямой полярности с присадочными прутками из бронзы БрОФ6,5–0,15 и БрОФ9–0,3 с дополнительной подачей флюса – борного шлака; лучшие результаты достигаются при использовании прутков марки OKAutrod 19.30 (3 % Si; 0,9 % Mn; 0,1 % Sn).

При сварке покрытыми электродами на постоянном токе обратной полярности применяют прутки из бронзы БрОФ6,5–0,15 с покрытием на основе криолита, а также электроды марки OKAutrod 94.25 с основным покрытием, обеспечивая такой состав наплавленного металла: 7,0 % Sn, 0,5 % Mn, 0,5 % Fe, 0,1 % P, остаток Cu. Сварку рекомендуется выполнять на параметрах режима, приведенных в табл. 57.

Технология подготовки дефекта под наплавку такая же, как и для газовой сварки.

Механизированная сварка в среде защитных газов и под флюсом применяется для сварки облицовок из бронз БрОЦ10–2, БрОЦС5–5–5 и БрОЦС8–4–3 при толщинах стенки 20–45 мм на постоянном токе обратной полярности на параметрах режима, данных в табл. 4.30.

Таблица 4.30. Ориентировочные параметры режима механизированной сварки стыковых соединений оловянных бронз

Электродная проволока		Флюс или за- щитный газ	$I_{\text{св}}$, А	$U_{\text{д}}$, В	$V_{\text{св}}$, м/ч	$Q_{\text{Аг}}$, л/мин
Марка бронзы	d_3 , мм					
Бронза БрОЦ10–2						
БрОЦ4–3	2	ОСЦ-45	220–240	32–34	17	—
БрОЦ4–3	3	ОСЦ-45	300–350	30–32	19	—
БрОФ8–0,3	2	ОСЦ-45 + 5 % борного шлака	220–240	32–34	15	—
Бронзы марок БрОЦС5–5-5; БрОЦС8–4-3						
БрАМц9–2	2	Аргон	220–240	27–29	26	18

Автоматическая сварка бронзы БрОЦ10–2 выполняется в аргоне с использованием присадки из бронзы БрАМц9–2, если изделие работает в морской воде; для других сред используют проволоку из бронзы БрОФ8–0,3. Кромки собираемых деталей обрабатываются на станках с высокой точностью и плотно подгоняются в соединение «в замок».

Для сварки облицовок из бронз марок БрОЦС8–4–3, БрОЦС5–5–5 с толщиной стенки 20–40 мм рекомендуется проволока из бронзы БрАМц9–2 диаметром 1,2–2,0 мм при условии предварительной наплавки кромок слоем толщиной 8–10 мм и дальнейшей сварки валиками шириной 40–50 мм и длиной 100–120 мм или без предварительной наплавки с проковкой каждого валика непосредственно после обрыва дуги; в процессе изделие охлаждается мокрым асбестом с обдувом воздухом. После сварки проводится термическая обработка.

При автоматической сварке под флюсом ОСЦ-45 + 5 % борного шлака облицовок из бронзы БрОЦ10–2 применяется проволока марки БрОЦ4–3 или БрОФ8–0,3 диаметром не более 2 мм. Технология процесса сложная и предусматривает: 1) предварительную термическую обработку заготовок при $T = 500\text{--}550\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 3 ч; 2) проковку подготовленных под сварку кромок и прилегающих поверхностей; 3) наплавку кромок этой же проволокой с охлаждением каждого валика и всего шва до $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Эта технология применяется для сварки бронзы непосредственно на валу.

Другая технология сварки частей облицовки отдельно от вала предполагает использование тех же материалов и той же предварительной термической обработки: сварку на погонной энергии 800–1200 кДж·ч/м с охлаждением каждого валика до $160\text{ }^{\circ}\text{C}$, промежуточный отжиг 4 ч после заварки половины сечения стыка при $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, отжиг 5 ч полностью сваренного изделия при $T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для заварки дефектов литья можно использовать покрытые электроды марки ОЗБ-2М, изготовленные по ТУ 14168-35–83 со стержнем из бронзы БрОФ6,5–0,4 и покрытием основного типа с добавлением в него Ni 0,5–0,7 % (по массе).

Как следует из приведенного выше материала, оловянистые бронзы относятся к материалам с очень плохой свариваемостью.

4.10. Сварка кремнемарганцевых бронз

Кремнемарганцевые бронзы используются в виде поковок, проката по ГОСТ 18175–78, отливок по ГОСТ 493–79 и маркируются так: БрКМц3–1 (2,7–3,5 % Si, 1,0–1,5 % Mn, остаток Cu). При их сварке возникает трудность, обусловленная их красноломкостью в интервале температур 800–950 °С, поэтому следует выбирать параметры режима, при которых охлаждение сварного шва в указанном диапазоне температур протекало бы как можно быстрее. Эти бронзы обладают высокой жидкотекучестью, в связи с чем их можно сваривать только в нижнем или наклонном положении. Перед сваркой металла толщиной более 4–5 мм и до 10–12 мм требуется V-образная разделка, при больших толщинах – X-образная. Угол раскрытия кромок составляет 70–90°, а притупление 1–2 мм. Требования к сборке, постановке прихваток, их размеру и расстоянию между ними такие же, как при сварке алюминиевых бронз. В качестве присадочной проволоки и стержней используется бронза БрКМц3–1.

Газовая сварка выполняется нормальным ацетиленокислородным пламенем с использованием присадки и флюсов, аналогичных применяемым при сварке меди и латуней. При сварке крупногабаритных деталей сложной конфигурации требуется предварительный подогрев до 300–350 °С. Сварное соединение обеспечивает прочность и пластичность на уровне 80–95 % основного металла.

Сварка вручную покрытыми электродами ведется на постоянном токе обратной полярности. Стержень изготавливается из сплава БрКМц3–1, а покрытие фтористо-кальциевого типа. Лучшие результаты достигаются при использовании электродов марки ОК 94.55 (Швеция), которые применяются также для наплавки бронзой БрКМц3–1 поверхностей стальных деталей; ими можно выполнять стыковые и угловые швы в нижнем и горизонтальном положении, а также в вертикальном положении способом снизу вверх. Наплавку кремнемарганцевой бронзы на сталь чаще всего выполняют вручную покрытыми электродами, иногда пучком электродов малого диаметра, а также плазменно-дуговым способом на параметрах режима, приведенных в табл. 4.29.

Ручная дуговая сварка вольфрамовым электродом выполняется на постоянном токе прямой полярности на параметрах режима, данных в табл. 4.31.

Таблица 4.31. Ориентировочные параметры режима аргонодуговой сварки стыковых соединений из бронзы БрКМц3-1

Вид подготовки кромок	Толщина металла, мм	$d_{Wэ}$, мм	$d_{прис}$, мм	$I_{св}$, А	Q_{Ar} , л/мин	Число проходов
Без разделки	1,6	3	2	60–90	5	1
То же	3,2	3	2	80–150	5–7	1
—>>—	4,8	4	3	100–200	7–8	1
—>>—	6,4	5	3	150–250	7–8	1
Разделка под углом 45°	12,7	6	3	150–300	7–8	2
Одно или двухсторонняя разделка под углом 45°	19,0	6	4	250–400	8–9	4–6
То же	25,4	6	4	300–500	8–10	4–6

Марганцевая бронза марки БрМц5 (4,5–5,5 % Mn, остаток — Cu) по своим характеристикам подобна меди, за исключением меньшей почти в 9 раз теплопроводности, поэтому все технологические рекомендации по сварке меди, как и сварочные материалы, пригодны и для сварки этой бронзы, — покрытые электроды марок «Комсомолец», АНЦ-1, а при сварке вольфрамовым электродом применяется присадка в виде стержней из бронзы БрМц5. Перед сваркой изделие нужно подогреть до $T = 400–500^\circ\text{C}$.

Хромовые бронзы маркируются так: БрХ0,7 (0,6–0,9 % Cr, остаток — Cu). Это дисперсионно-твердеющие сплавы, склонные к горячеломкости в широком диапазоне температур, что значительно усложняет их сварку. Их нужно сваривать в перестаренном состоянии и за один проход. Для борьбы с оксидной пленкой хрома ($T_{пл} = 2340^\circ\text{C}$) сварка вольфрамовым электродом ведется на переменном токе, а плавящимся электродом — под специальным флюсом. Из хромовых бронз изготавливают

кристаллизаторы для дуговых вакуумных и электрошлаковых печей.

Сварка вручную покрытыми электродами марки АНЦ-1 применяется при выполнении коротких швов без подогрева при толщине металла до 15–20 мм, а при больших толщинах — с предварительным подогревом до 200–400 °С. Сварка ведется на постоянном токе прямой полярности; сила тока выбирается по эмпирической зависимости 80–100 А на 1 мм диаметра электрода при напряжении на дуге 45–50 В.

Плазменно-дуговым способом можно сварить металл толщиной до 40 мм без разделки кромок односторонним швом за один проход, при больших толщинах выполняется двухсторонняя разделка. Сварка ведется порошковой проволокой ПП-БрХТ12–2 по слою флюса марки АН-26С на параметрах режима, представленных в табл. 4.32.

Таблица 4.32. Ориентировочные параметры режима плазменно-дуговой сварки бронзы БрХ0,8

Способ сварки	Толщина металла, мм	$I_{св}$, А	U_d , В	$V_{св}$, м/ч	$Q_{газ}$, л/мин	
					Ar	He
Односторонняя	20	850–900	44–46	9–9,5	5	20
	30	1000–1100	50–52	6–6,7	5	22
	40	1150–1200	50–54	5,5–6,0	7	23
Двухсторонняя	40	1100–1200	48–52	7,8–8,3	5	22
	60	1250–1300	50–54	5,0–5,6	7	23
	80	1350–1400	52–56	3,3–3,9	10	27

Автоматическая сварка под флюсом позволяет получать качественные сварные швы соединений хромовой бронзы без подогрева за один проход с полным проваром всего стыка. Разделка кромок выполняется в виде полуокружности радиусом, равным половине толщины свариваемых листов. Сварка ведется на флюсовой подушке с применением заходных и выходных планок присадочной проволокой марки БрХТ0,6–0,5 с использованием флюса АН-М13 на параметрах режима, данных в табл. 4.33.

Таблица 4.33. Ориентировочные параметры режима автоматической сварки под флюсом бронзы БрХ0,8 на постоянном токе обратной полярности (напряжение на дуге 48–62 В)

Толщина металла, мм	d_z , мм	$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	Толщина металла, мм	d_z , мм	$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч
16–20	5	800–900	7,9–12	30–40	6	1100–1300	5–6
20–30	5	900–1100	6–7,9	40–60	6	1300–1600	2–6

После сварки конструкцию подвергают двойной термообработке — закалке на твердый раствор и последующему старению для придания ей однородных служебных характеристик.

Бериллиевая бронза марки БрБ2 (1,8–2,1 % Be, 0,2–0,5 % Ni, остаток — Cu) также принадлежит классу дисперсионно-твердеющих сплавов; фазовые превращения приводят к повышению ее плотности, что отражается на уменьшении линейных размеров на 0,2 % и соответственно на увеличении остаточных напряжений. Чтобы не было трещинообразования при сварке, сплав нужно перестарить: при отпуске его передерживают при определенной температуре больше 2 ч, благодаря чему он будет гораздо мягче вследствие выпадения более грубых фаз старения и в процессе сварки не будет перезакаливаться на твердый раствор. Во время сварки бериллий окисляется, поэтому его сварка ведется вольфрамовым электродом в инертных газах: на переменном токе в аргоне или смеси Ar + (30–50 %) He. Перед сваркой проводится предварительный подогрев до $T = 100–200\text{ }^{\circ}\text{C}$, подготовка кромок такая же, как и для алюминиевых бронз. В качестве присадки используется проволока марки БрБ2, а процесс ведется на параметрах режима: $I_{св} = 110–150\text{ А}$, $U_d = 11–14\text{ В}$, $Q_{Ar} = 9–10\text{ л/мин}$, $Q_{He} = 12–15\text{ л/мин}$.

После сварки обязательна термическая обработка — закалка на твердый раствор и повторное старение — отпуск.

4.11. Сварка медно-никелевых сплавов

Медно-никелевые материалы в виде листов, труб, полос применяются для изготовления изделий, работаю-

щих в морской воде, органических кислотах, растворах солей и т.п. Они изготавливаются в соответствии с ГОСТ 492–73 «Никель, сплавы никелевые и медно-никелевые, обрабатываемые давлением» и маркируются так: МНЖ5–1 (1–1,4 % Fe, 0,3–0,8 % Mn, 5,0–6,5 % (Ni + Co), остаток Cu), МНЖМц30–1–1 (0,5–1 % Fe, 0,5–1,0 % Mn, 29–33 % (Ni + Co), остаток Cu).

Основная трудность при сварке связана со склонностью к образованию горячих трещин, что обусловлено теми же причинами, что отмечаются при сварке меди; присутствие никеля в сплаве увеличивает вероятность образования трещин. Этому способствуют также вредные примеси: висмут, свинец образуют межзеренные жидкие прослойки; для борьбы с ними вводятся модификаторы — редкоземельные металлы, придающие мелкозернистость структуре. Наличие плоховыводимых в шлак частиц окиси никеля ($T_{пл} = 2090^\circ\text{C}$) и порообразования преодолевается сваркой в инертной защитной атмосфере и компонентами флюсов и покрытий.

Для сварки медно-никелевых сплавов используют две марки сварочных проволок — проволока МНЖ5–1 — для сварки однородных сплавов, а также с латунями, алюминиево-марганцевой бронзой и проволока МНЖКТ5–1–0,2–0,2 для ручной, механизированной сварки в защитных газах медно-никелевых сплавов, а также меди с бронзой, латунью и сталями, для наплавки их на сталь.

Газовая сварка выполняется нормальным ацетиленокислородным пламенем с применением проволоки МНЖ5–1 и флюсов на борной основе; прочность сварного соединения составляет лишь 80–90 % прочности основного металла, поэтому способ применяется редко.

Ручная дуговая сварка покрытым и вольфрамовым электродом применяется для соединений из сплавов МНЖ5–1, МН-10, МН-19, МНЖМц30–1–1, предполагает использование в качестве стержня или присадки сплава МНЖ5–1 или МНЖКТ5–1–0,2–0,2. На стержень наносится покрытие фтористо-кальциевого типа, например МН4 состава: 30 % CaCO_3 , 35 % CaF_2 , 10 % TiO_2 , 10 % алюминиевой пудры, 5 % FeTi , 8 % криолита, 2 % поташа, процесс ведется на постоянном токе об-

ратной полярности, а при сварке вольфрамовым электродом — в среде аргона или азота на постоянном токе прямой полярности. Предварительный подогрев сплавов, содержащих железо не только не нужен, но и вреден.

Способ применяется во всех пространственных положениях для стыковых соединений толщиной 1–16 мм, угловых соединений и внахлестку толщиной 1–10 мм и тавровых толщиной 2–12 мм, когда в односторонних швах требуется полный провар кромок швов. Подготовка кромок под сварку, порядок постановки прихваток такие же, как и для сварки меди.

Прихватки и сварка осуществляются присадочной проволокой марки МНЖКТ5–1–0,2–0,2 в сочетании с аргоном или азотом на постоянном токе прямой полярности при расходах аргона 5–10 л/мин и азота 10–13 л/мин на параметрах режима, данных в табл. 4.34 и 4.35.

Таблица 4.34. Ориентировочные параметры режима аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом стыковых кольцевых неповоротных соединений из сплава МНЖ5–1 (напряжение на дуге 10–15 В для всех случаев)

Толщина металла, мм	$d_{WЭ}$, мм	$d_{прис}$, мм	$I_{св}$, А, при выполнении			
			первого валика		последующих валиков	
			«на весу»	на подкладке	«на весу»	на подкладке
1,5	2–3	2–3	50–60	—	60–70	—
2,0	2–3	2–3	55–65	70–80	65–75	—
2,5	3–4	2–4	60–70	80–90	70–80	—
3,0	3–4	2–4	70–80	90–100	80–90	—
4,0	3–4	2–5	80–90	100–110	90–100*	120–130*
5,0	4–5	2–5	90–100	110–120	100–110**	130–140**
10,0	5	3–5	160–170	170–190	260–270*** 280–380****	270–280*** 280–300****

* Второй и третий валики. ** Второй–четвертый валики. *** Второй валик. **** Третий–восьмой валики.

Таблица 4.35. Ориентировочные параметры режима азотно-дуговой сварки вольфрамовым электродом угловых швов соединений из сплава МНЖ5-1 (напряжение на дуге 26–28 В для всех случаев)

Толщина металла, мм	$d_{Wэ}$, мм	$d_{прис.}$, мм	$I_{св}$, А	Толщина металла, мм	$d_{Wэ}$, мм	$d_{прис.}$, мм	$I_{св}$, А
2,5	3	2–3	70–115	4	4	4–5	120–150
3,0	3	3–4	105–120	5	5	5	130–170

Техника сварки аналогична таковой при сварке меди.

При многослойной сварке наложение каждого последующего шва осуществляется после очистки и охлаждения предыдущего шва до 50–60 °С.

Автоматическая сварка в аргоне вольфрамовым электродом применяется прежде всего при выполнении кольцевых неповоротных стыков труб. При сварке корневого шва обязательно использование присадки во избежание образования горячих трещин и для повышения производительности. Параметры режима сварки приведены в табл. 4.36.

Таблица 4.36. Ориентировочные параметры режима автоматической аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом стыковых (кольцевых) неповоротных соединений из сплава МНЖ5-1

Толщина металла, мм	$d_{Wэ}$, мм	Номер прохода	$I_{св}$, А	$U_{д.}$, В	$V_{св}$, м/ч
2,5–3,0	2	1–2	100–105	10	9
4,0	3	1–4	180–200	8–9	15
5,0	3	1	200–205	8–9	15
		2–5	210–220	8–9	16
7,0	3	1	200–205	8–9	16
		2–8	220–230	8–9	14

Примечания. Диаметр присадочной проволоки 1,6 мм, скорость ее подачи 36 м/ч; расход аргона 8–10 л/мин.

Нижние слои многопроходного шва имеют повышенные свойства по сравнению с верхними благодаря их термической обработке, а коррозионная стойкость остается такой же, как и у основного металла.

Механизированная сварка плавящимся электродом в среде защитных газов обеспечивает значительно более высокую производительность по сравнению с рассмотренными выше способами. Она выполняется на постоянном токе обратной полярности в среде аргона или азота с применением сварочной проволоки марки МНЖКТ5-1-0,2-0,2 диаметром не более 1,6 мм.

Подготовка кромок под сварку при V-образной и X-образной разделке предусматривает угол раскрытия $30^\circ \pm 3^\circ$ на одну сторону, а при U-образной для неповоротных стыков труб неплавящимся электродом $30^\circ \pm 5^\circ$ при толщине металла 4–5 мм и $40^\circ \pm 5^\circ$ при толщине 6–7 мм.

Таблица 4.37. Ориентировочные параметры режима полуавтоматической сварки плавящимся электродом в азоте соединений из сплава МНЖ5-1 проволокой МНЖКТ5-1-0,2-0,2 диаметром 1,2 мм (расход азота 18–20 л/мин)

Тип шва	Толщина металла, мм	Число валиков	$I_{св}$, А	U_d , В
Стыковой (кольцевой) на подкладке или на подварочном шве*	4–5	1	180–200	28–30
	8–10	2	190–210	29–30
	15	3	210–240	30–32
Угловой в угловых и тавровых соединениях	5; 8**	1	200–220	26–28
	8; 8**	2–3	220–230	32–34
	5; 15**	1	240–250	32–34
	8; 15**	3	240–250	32–34
	15; 15**	5	250–270	34–36

* Сварка на подъем при подкантовке свариваемых узлов. ** Толщины совместно свариваемых деталей.

При односторонней сварке стыковых швов на съемных подкладках ширина зазора составляет 1,5–2,5 мм; при этом номинальная ширина шва 5–28 мм, а высота усиления 1–2 мм.

Если применяются остающиеся подкладки из того же сплава шириной 15–20 мм и толщиной 2–3 мм, зазор составляет 0–3 мм, ширина шва от 5 до 29 мм, а высота усиления 1–2 мм.

При двухсторонней сварке «на весу» номинальные размеры зазоров в стыковых швах изменяются от 1 до 4 мм, ширина шва составляет 6–24 мм в зависимости от его типа, а ширина подварочного шва при V-образной разделке – 3–13 мм.

При автоматической сварке для U-образной разделки зазоры составляют 0,5–1,0 мм, притупление – 1,5 мм, ширина шва от 8 до 14 мм, усиление – 1,5 мм, а для V-образной разделки зазор нулевой, притупление 0,5 мм, ширина шва 6 мм, усиление 1 мм. Требования к постановке прихваток те же, что и при сварке меди. Сварка ведется электродными проволоками диаметром не более 1,6 мм на постоянном токе обратной полярности на параметрах режима, приведенных в табл. 58 и 4.37.

Сварка под флюсом ведется на постоянном токе обратной полярности и выполняется с использованием проволок БрОЦ4–3 или МНЖКТ5–1–0,2–0,2 в сочетании с плавле-ным флюсом ОСЦ-45. Если формирование обратной стороны шва производится на графитовой подкладке, ее нужно пред-варительно прокалить при температуре 200–300 °С. Сварка под керамическим флюсом ЖМ-1 может выполняться как медной проволокой марок МО, М1, так и близкой к составу свариваемого металла. Сварка ведется на постоянном токе обратной полярности на параметрах режима, приведенных в табл. 4.38.

Таблица 4.38. Ориентировочные параметры режима автоматической сварки под флюсом сплавов МНЖ5–1 и МН10 сварочной проволокой марки МНЖКТ5–1–0,2–0,2

Толщина металла, мм	d_s , мм	$I_{св}$, А	U_d , В	$V_{св}$, м/ч	Марка флюса
5	4	390–420	28–30	40	ОСЦ-45
10	4	590–620	32–34	20	ОСЦ-45
15	6	890–920	36–38	12	ОСЦ-45
20	5	1180–1220	40–42	8	ОСЦ-45
5–6	3–4	400–450	28–30	25	ЖМ-1

Параметры режима плазменно-дуговой наплавки медно-никелевых сплавов на стали приведены в табл. 55, 56.

4.12. Изготовление трубопроводов из меди и медно-никелевых сплавов

При сварке трубопроводов — изделий небольшого диаметра со стенками малых толщин — существует своя специфика, которую нужно учитывать при работе как в цеховых условиях, так и на монтаже.

Если сварка продольных швов при изготовлении труб не слишком отличается от сварки стыковых соединений листовых конструкций, то выполнение кольцевых швов связано с необходимостью их вращения в процессе сварки, а в случае невозможности этого движения их нужно сваривать в различных пространственных положениях. Чем меньше диаметр трубы, тем сложнее техника сварки и тем выше должна быть квалификация сварщика. Хотя для сварки неповоротных стыков труб разработаны специальные автоматы, их не всегда можно использовать вследствие невозможности их размещения на изделии. Трудности возрастают, если сварочные работы выполняются на монтаже, например в судостроении, где очень усложняется использование защитных газов (а большинство способов сварки так или иначе предполагает только такую защитную среду). Поэтому подготовка сварщика трубопроводных конструкций требует большого времени для приобретения им необходимых знаний и практических приемов по технологии и технике выполнения сварных соединений.

Размеры конструктивных элементов свариваемых кромок и швов, обеспечивающих получение качественных соединений при изготовлении трубных конструкций, регламентирует ГОСТ 16038—80 «Основные типы, конструктивные элементы и размеры сварных соединений для труб из меди М1р, М2р, М3р и медно-никелевого сплава марки МНЖ5—1 с фланцами из латуни Л90 и с штуцерами и ниппелями из бронз БрАМц9—2 или БрАЖНМц9—4—4—1».

Способы сварки трубопроводных конструкций из различных медных сплавов и соответствующие сварочные материалы приведены в табл. 59.

Ручная дуговая сварка в защитных газах применяется при изготовлении трубопроводных изделий со стенкой толщиной менее 2–2,5 мм, диаметром трубы 24–45 мм при наличии отводов диаметром 20–55 мм при сварке встык «на весу». Автоматическую сварку целесообразно использовать при соединении труб с фланцами и колец из латуни и сварке «на весу» большого числа труб одинакового диаметра. Ручная сварка покрытыми электродами может применяться как исключение, если невозможно ведение процесса в защитных газах. При монтаже трубопроводов (сварка неповоротных стыков труб) целесообразно применять ручную сварку вольфрамовым электродом в защитных газах. Если возможно использование специальных автоматов, их габариты и значительные потери времени на перенос и переналадку аппаратуры настолько усложняют процесс, что он становится малоэффективным.

Выбор рода защитного газа определяется следующими соображениями: азот лучше всего использовать для сварки более толстого металла (более 3 мм) вследствие большего тепловыделения дуги на основном металле, в то время как при сварке аналогичных толщин в аргоне требуется подогрев от постороннего источника теплоты. Кроме того, азот дешевле аргона. Общим правилом является использование азота особо чистого, аргона высшего, первого или второго сортов.

При выборе марки сварочной проволоки нужно иметь в виду, что проволока марки БрКМцЗ–1 дешевле проволоки марки МНЖКТ5–1–0,2–0,2, но при использовании комбинированного способа сварки корневой шов должен выполняться только проволокой последней марки; целесообразность использования проволок БрКМцЗ–1 и БрАМц9–2 одинаковая.

Все материалы, поступающие на производство, обязательно должны сопровождаться сертификатами, паспортами, свидетельствующими об их качестве и соответствии требованиям стандартов и технических условий.

Особенности сварки медных трубопроводов. Зачищенные и обезжиренные кромки свариваемых труб собираются с по-

постоянно находится в зоне защитного газа. Дуга зажигается на графитовой пластине или от осциллятора и после разогрева конца вольфрамового электрода переносится на свариваемый узел, и начинается процесс сварки. Нельзя касаться электродом свариваемых поверхностей или сварочной ванны. Если это произошло, нужно оборвать дугу, удалить участок шва, где было касание, обезжирить и протереть чистой ветошью соединение, возбудить дугу и продолжить сварку. Дугу обрывают плавно, медленно перемещая горелку на ранее выполненный участок шва, и еще 10–15 с защищают металл шва от воздуха, после чего горелка отводится и подача газа прекращается. Заварка кратера выполняется без присадки с постепенным переходом на ранее выполненный участок шва и гашения дуги.

При сварке корневых проходов «на весу» шов образуется за счет расплавления присадки, кромок или притупления, а при сварке на остающемся подкладном кольце — за счет расплавления кромок и подкладного кольца. При сварке корневых проходов стыковых соединений труб со штуцером и ниппелем на медной конусной пробке шов образуется за счет расплавления кромок, хотя допускается использование присадки.

Вольфрамовый электрод удерживается перпендикулярно оси трубы, а присадка подается под углом 90° к оси электрода. Сварка неповоротных стыковых соединений и внахлестку выполняется отдельными участками — снизу вверх, последовательно с одной и другой стороны трубы. Поворотные соединения труб свариваются в нижнем или близком к нему положении. Начала и концы всех участков швов, поворотных и неповоротных соединений перекрываются на длине 5–10 мм. Стыковые соединения сегментов колен сваривают, как правило, «на весу», односторонним или двухсторонними швами (в последнем случае первый шов накладывается внутри узла) или на съемном кольце, или на флюсовой подушке.

В любом случае сначала заваривается одно стыковое соединение, потом пристыковывается и заваривается следующий сегмент и т.д. Продольные стыковые соединения свариваются на флюсовой подушке, «на весу» или на массивной медной трубе с толщиной стенки не менее 7 мм.

Приварка отростков, равнопроходных или диаметром, близким диаметру труб, выполняется напроход. Сварку начи-

нают там, где находится нахлесточное соединение, а узел 2—3 раза поворачивается в процессе сварки вокруг оси трубы.

Отростки, диаметры которых значительно отличаются от диаметра труб, привариваются участками при однократном повороте свариваемого узла. При одинаковых толщинах стенки отростка и стенки трубы горелка направляется по биссектрисе образуемого между ними угла, а при разных толщинах горелка наклоняется так, чтобы больше теплоты выделялось на толстой детали.

При сварке угловыми швами фланцев (колец) с трубами в начальный момент дуга направляется главным образом на фланец (кольцо); по мере их нагревания наклон горелки изменяется до положения, соответствующего биссектрисе угла. Сварку рекомендуется вести «в лодочку», плавно или ступенчато, поворачивая узел, или в нижнем положении. Дуга зажигается только на фланце (кольце) в месте расположения будущего шва. Таким же образом привариваются нажимные шайбы, но дуга зажигается на трубе.

Сварка бронзовых промежуточных штуцеров и ниппелей с трубами выполняется стыковыми швами в нижнем или близком к нему положении на цельных конусных медных пробках, вводимых внутрь трубы. Перед сваркой стыковых и угловых соединений на свариваемые кромки штуцера и ниппеля наносится водный раствор флюса 34А. В начале их сварки по мере нагревания угол наклона изменяется и теплота дуги распределяется более равномерно между штуцером и трубой. Приварка этих деталей на переменном токе выполняется так же, но без флюса.

Автоматическая сварка стыковых соединений «на весу» вольфрамовым электродом в аргоне и гелии рекомендуется для труб диаметром не менее 38 мм с толщиной стенки 2,5 мм на постоянном токе прямой полярности на параметрах режима, приведенных в табл. 4.42.

Перед сваркой стыковых соединений необходимо: 1) выставить горелку автомата так, чтобы расстояние от сопла горелки до поверхности трубы было не менее 6 мм; 2) отрегулировать подачу сварочной проволоки так, чтобы она направлялась по касательной к окружности стыка, а конец проволоки касался

дна разделки или поверхности предыдущего слоя на расстоянии 3—4 мм от возможной точки касания вольфрамового электрода и чтобы проволока плотно прижималась к месту касания; 3) установить заданный режим сварки и проверить наладку автомата при его вращении (без сварки); 4) продуть в течение 1—2 мин шланги и горелку аргоном; 5) заполнить полость трубы азотом или аргоном, после чего можно начинать сварку. При сварке корневого прохода электрод должен перемещаться над линией стыка, а присадка — по линии стыка. При заполнении разделки сварщик смещает электрод и проволоку поочередно к скосам разделки.

Таблица 4.42. Ориентировочные параметры режима автоматической сварки вольфрамовым электродом неповоротных стыковых соединений медных и медно-никелевых труб сварочной проволокой диаметром 1,6 мм

Толщина стенки трубы, мм	Диаметр трубы, мм	$d_{Wэ}$, мм	Номер прохода	$I_{св}$, А	U_d , В	$V_{св}$, м/ч	Защитный газ
5	135	4	1—6	260—270	10—11	15	Гелий
7	114	5	1—8	270—290	10—11	14	То же
2,5—3	38*	2	1	100	11	11	Аргон
2,5—3	38	2	2	100—105	11	11	То же
2,5—3	38—85	2	1—2	100—105	10	9	—>>—
4	80	3	1—4	180—200	8—9	15	—>>—
5	110—135	3	1	200—205	8—9	15	—>>—
5	110—135	3	2—5	210—220	8—9	16	—>>—
7	114	3	1	200—205	8—9	16	—>>—
7	114	3	2—8	220—230	8—9	14	—>>—

* Режимы приведены для сварки соединений с зазором в стыке. В других случаях режимы приведены для соединений без зазора в стыке.

При наличии зазора в стыке сварку нужно начинать только на прихватке. В начале сварки любого прохода на участке длиной 10—20 мм нужно произвести местный подогрев без подачи присадки, которая подается только тогда, когда на поверхности дна разделки или предыдущего валика появится ванна рас-

плавленного металла. Начало каждого прохода перекрывается на длине 10–20 мм; при этом на участке перекрытия нужно также осуществлять плавное гашение дуги. Время гашения дуги при сварке труб с толщиной стенки не более 4 мм составляет 4 с, а при толщине стенки 4–7 мм — не менее 5 с. После гашения дуги автомат останавливается, а защитный газ еще 10–15 с подается в горелку. Сварку фланцев из латуни Л90 в аргоне рекомендуется выполнять с трубами диаметром не менее 45 мм при толщине стенок 3 мм, фланцев из латуни ЛЦ16К4 — при толщине стенок труб не менее 2,5 мм; в обоих случаях сварка выполняется на постоянном токе прямой полярности; другие параметры режима приведены в табл. 4.43.

Таблица 4.43. Ориентировочные параметры режима автоматической аргодуговой сварки вольфрамовым электродом медных и медно-никелевых труб с фланцами

Толщина стенки трубы, мм	Сварочный ток, А, при		Постоянные параметры режима сварки
	МЗр + Л90 или ЛЦ16К4	МНЖ 5–1 + Л90	
2,5	360–380	290–300	$d_{\text{вз}} = 6 \text{ мм}$; $d_{\text{прис}} = 2 \text{ мм}$; $V_{\text{пэ}} = 30\text{--}50 \text{ м/ч}$; частота колебаний электрода 60–120 в 1 мин; размах колебаний электрода на 2–3 мм меньше ширины фаски на фланце; $U_{\text{д}} = 14\text{--}15 \text{ В}$; $V_{\text{св}} = 4\text{--}6 \text{ м/ч}$; $Q_{\text{Ар}} = 10\text{--}12 \text{ л/мин}$
3	360–380	290–300	
3,5	380–420	300–340	
4	420–460	340–370	
5	430–470	350–380	

Перед сваркой нужно настроить автомат так, чтобы вольфрамовый электрод был направлен в корень разделки под углом $\alpha = 50\text{--}55^\circ$ (рис. 4.6). Его соответствие проверяется при вращении автомата без сварки. Далее: 1) в течение 1–2 мин горелка и шланги продуваются аргоном; 2) выполняется предварительный подогрев начального участка трубы ($1/6$ периметра трубы) автоматом без подачи электродной проволоки или посторонним источником нагрева так, чтобы поверхность трубы не оплавилась; 3) при ширине фаски на фланце до 6 мм сварка ведется за один проход, при большей ширине — за 2–3 прохода. Начало каждого прохода перекрывается на длине 10–15 мм, дуга гасится плавно в течение 7–15 с также на участке перекрытия.

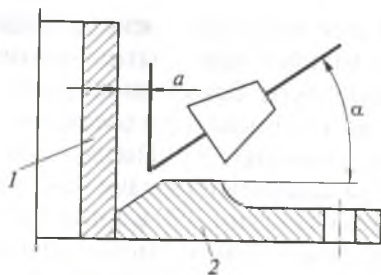


Рис. 4.6. Положение вольфрамового или плавящегося электрода при настройке автомата и сварке на поперечном сечении шва:

1 — труба; 2 — фланец

Полуавтоматическая сварка плавящимся электродом в защитных газах применяется при выполнении поворотных соединений встык и внахлестку труб диаметром $d_t \geq 45$ мм при толщине стенок 2–2,5 мм и более, при сварке фланцев, колец и нажимных шайб с трубами диаметром $d_t \geq 24$ мм и при толщине стенок $s \geq 2$ мм, для приварки к трубам отростков диаметром $d_t \geq 24$ мм или $d_t \geq 55$ мм (в зависимости от соотношений диаметров отростка и трубы) и толщине стенок труб $s \geq 2,5$ мм; при сварке ответвленных штуцеров и приварышей диаметром $d_t \geq 20$ мм при толщине стенок труб $s \geq 2,5$ мм; при сварке соединений внахлестку промежуточных штуцеров и ниппелей с трубами диаметром $d_t \geq 24$ мм и толщиной стенок $s \geq 2$ мм, а также для сварки продольных швов на подкладках труб, изготовленных из листового материала толщиной $s \geq 2,5$ мм. Этот способ можно применять и при комбинированной сварке при тех же диаметрах и толщинах.

Трубы с толщиной стенок $s \geq 5$ мм (в зависимости от конструкции соединения) перед сваркой требуют предварительного подогрева до $T = 200–500$ °С. Сварка ведется на постоянном токе обратной полярности на параметрах режима, данных в табл. 61.

Первый проход в многопроходных швах выполняется без поперечных колебаний горелки, а дальнейшие — с ее колебаниями. После перерыва дуга зажигается на выполненном и зачищенном участке шва на расстоянии 10–15 мм от кратера, который заваривается до остывания шва путем кратковременного включения полуавтомата. Нельзя зажигать дугу на прихватке. После каждого обрыва дуги нужно задерживать горелку над местом обрыва на 10–15 с для защиты металла шва от воздуха. В качестве съемных подкладок можно использовать флю-

совые подушки с любым флюсом для сварки сталей; она наиболее эффективна при сварке продольных швов. Можно использовать также медные трубы со стенкой толщиной $s \geq 10$ мм, сплошные медные конусные пробки, которые особенно эффективны для приварки фланцев и колец к трубам со стенкой толщиной менее 3 мм, медные кольца со стенкой толщиной $s \geq 10$ мм.

Перед сваркой продольных швов к трубе нужно приваривать заходные и выходные планки толщиной, равной толщине стенки трубы, на которых начинается и заканчивается процесс сварки. Кольцевые соединения сегментов колен свариваются на съемном кольце или флюсовой подушке, или двухсторонними швами, причем первым выполняется шов изнутри колена или по корневому проходу, выполненному снаружи колена ручной сваркой в среде защитных газов. В любом случае сначала сваривается и принимается одно стыковое соединение, а потом пристыковывается и заваривается следующий сегмент и т.д. Кольцевые стыковые соединения труб свариваются также и на остающихся медных кольцах или по корневому проходу, выполненному снаружи вручную вольфрамовым электродом.

Во всех случаях при сварке кольцевых соединений рекомендуется небольшая подкантовка узла во время сварки, при этом направление сварки должно быть встречно направлению поворота узла. При ступенчатом повороте, т.е. при сварке участками, конец предыдущего участка перекрывается на длине 7–10 мм. Электродную проволоку нужно всегда направлять радиально оси трубы. Сварку соединений труб внахлестку и труб с ниппелями рекомендуется выполнять по схеме на рис. 4.7. Аналогичное соединение можно осуществлять и при их горизонтальном положении.

Сварка фланцев, колец и промежуточных штуцеров с трубами, имеющими стенки толщиной $s \leq 7$ мм, выполняется в положении «в лодочку» или при вертикальном расположении трубы, а фланцев с трубами с $s = 8–15$ мм только «в лодочку» — сначала с тыльной стороны фланца, а потом со стороны разъема. При сварке фланцев и колец с трубами с $s \leq 3$ мм разрешается поддувать в трубу азот.

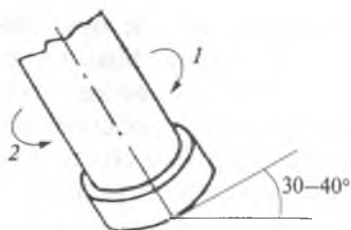


Рис. 4.7. Положение трубы при сварке поворотных соединений внахлестку:
1 – направление сварки; 2 – направление поворота трубы

Ось электродной проволоки при сварке должна всегда совпадать с плоскостью, которая проходит через ось трубы, и направляться приблизительно по биссектрисе угла, образованного фланцем или кольцом с трубой при толщине стенок труб до 3,5–4 мм; при больших толщинах стенок дугу нужно направлять на трубу и зажигать на трубе в районе расположения шва. Аналогично привариваются нажимные шайбы, но в этом случае можно использовать комбинированный способ сварки. Для приварки отростков, штуцеров и приварышей, внешний диаметр которых равен или отличается от диаметра трубы, нужно периодически поворачивать свариваемый узел вокруг оси трубы так, чтобы проводить сварку в нижнем или близком к нему положении.

Если толщина стенки отростка и трубы $s \leq 6$ мм, то участки шва нужно разносить и сварку в первую очередь выполнять там, где стенка отростка тоньше. При большей толщине стенок сварка выполняется напроход. Ответвления, внешний диаметр которых значительно отличается от диаметра трубы, привариваются двумя участками при многократном поворачивании узла. При приварке отростков с толщиной стенок меньшей, чем толщина стенки трубы, теплота дуги направляется главным образом на трубу.

Автоматическая сварка плавящимся электродом в защитных газах используется для соединения медных и медно-никелевых труб с латунными фланцами. Фланцы из латуни Л90 свариваются с трубами диаметром $d_f \geq 45$ мм при толщине стенок менее 3 мм, а из латуни ЛЦ16К4 при толщине стенок $s \geq 2,5$ мм на параметрах режима, приведенных в табл. 4.44.

Перед сваркой нужно настроить автомат в соответствии с данными табл. 4.44 и проверить его работу без сварки. Затем выполняются местный подогрев трубы (при толщине стенки

$s \geq 5$ мм) и продувка горелки и шлангов азотом в течение 1–2 мин. Нельзя начинать сварку на прихватке. Подогрев трубы перед сваркой второго прохода выполняется только в случае перерыва после сварки первого прохода. После приварки фланцев кратер заваривается вручную вольфрамовым электродом.

Таблица 4.44. Ориентировочные параметры режима автоматической сварки* плавящимся электродом в азоте медных труб с фланцами при $Q_{N_2} = 20\text{--}22$ л/мин

Толщина стенки тру- бы, мм	Диаметр трубы, мм	$I_{св}$, А	$U_{д}$, В	$V_{св}$, м/ч	Параметры настройки ав- томата (рис. 4.6)	
					Угол α , град	Размер a , мм
Электродная проволока диаметром 1,4 мм						
3	65	380—400	29—30	27—28	65	3—3,5
5	90	340—360	31—33	16—17	48—50	2—3
7	114	380—400	33—34	12—16	45—48	2—3
Электродная проволока диаметром 1,2 мм						
3	65	280—300	31—32	17	55	2—3
5	60	290—310	32—33	18	50	0**
5	80	290—310	32—33	16	50	0**
5	90	290—310	32—33	15	50	0**

* Сварка за один проход. ** Проволока направляется в корень разделки.

При сварке трубопроводов из сплава МНЖ5–1 используются все общие технологические рекомендации и указания, приведенные выше для сварки медных трубопроводов, а способы сварки и электродные материалы для них даны в табл. 59.

Сварка, как правило, осуществляется без предварительного подогрева; он нужен только при соединении фланцев к трубам со стенкой толщиной более 10 мм.

Ручная дуговая сварка покрытыми электродами на постоянном токе обратной полярности применяется только в тех случаях, если использование других способов невозможно. Па-

параметры режима выбираются в зависимости от толщины стенки трубы:

Толщина стенки, мм	2–2,5	3	110–140
d_3 , мм	3	3	120–160
$I_{св}$, А	4–5	4	160–200

Сварка поворотных трубных стыковых соединений и внахлестку и приварка к трубам фланцев (колец) выполняются при диаметре труб $d_t \geq 45$ мм и толщине стенок $s \geq 2$ мм, отрезков диаметром $d_t \geq 38$ мм и толщине стенок $s \geq 2,5$ мм, ответвленных штуцеров и приварышей диаметром $d \geq 20$ мм и при толщине стенок труб $s \geq 2,5$ мм. Процесс ведется только за один проход короткой дугой при постепенном перемещении электрода, т.е. ниточным швом без поперечных колебаний. Качественные прихватки не вырубаяются, но нельзя начинать сварку на прихватках.

Сварка стыковых соединений ведется с использованием остающихся медно-никелевых или съемных медных подкладных колец или флюсовых подушек. При приварке ответвленных штуцеров, приварышей, отрезков и фланцев (колец) к трубам со стенками толщиной $s \geq 4$ мм электрод направляется в угол по биссектрисе, а при толщине стенок менее 4 мм электрод смещается так, чтобы дуга горела главным образом на фланце (кольце), приварыше, штуцере.

Ручная сварка в защитных газах стыковых соединений труб выполняется многопроходным швами, причем каждый последующий проход накладывается после очистки и охлаждения предыдущего до $T = 50\text{--}60^\circ\text{C}$. Бронзовые детали свариваются с трубами только на постоянном токе прямой полярности; расход аргона составляет 5–10 л/мин, азота – 10–13 л/мин, другие параметры режима приведены в табл. 62–65.

Автоматическая сварка стыковых соединений труб вольфрамовым электродом осуществляется в аргоне, как и приварка латунных фланцев из Л90 к трубам при толщине их стенок 2,5–3 мм. При сварке стыковых соединений длина участка прогрева составляет 5–10 мм, а расход аргона в горелку достигает 8–10 л/мин.

Полуавтоматическая сварка плавящимся электродом в защитных газах — более производительный процесс, чем сварка неплавящимся электродом, и в полной мере может быть реализована как при сварке медно-никелевых трубопроводов, так и при приварке к ним различных деталей на параметрах режима, данных в табл. 65 и 66.

Сварка ведется на постоянном токе обратной полярности с расходом аргона и азота в горелку соответственно 8–10 и 18–20 л/мин. Ориентировочная скорость сварки при сварке фланцев и колец с трубами при $d_s = 1$ мм составляет 17–19 и 16–17 м/ч для труб с толщиной стенок соответственно 2–3 и 4–5 мм, а при $d_s = 1,2$ мм — 16–18 м/ч для труб с толщиной стенок 8–10 мм.

При сварке фланцев, колец и промежуточных штуцеров с трубами дуга зажигается только на фланце, кольце, штуцере в зоне расположения будущего сварного шва. При этом наклон электродной проволоки должен быть таким, чтобы теплота дуги выделялась главным образом на фланце (кольце). Так, при толщине стенок труб 2–5 мм угол наклона к фланцу (кольца) должен быть 55–65°, при толщине стенок 7–15 мм угол наклона составляет 70–80°.

Автоматическая сварка плавящимся электродом в защитных газах производится в основном для соединения латунных фланцев Л90 с медно-никелевыми трубами диаметром $d_t \geq 45$ мм в азоте при толщине стенок труб $s \geq 5$ мм и в смеси азота с аргоном при толщине стенок труб 3–4,5 мм на параметрах режима, приведенных в табл. 67.

При этом расход азота в горелку составляет 20–22 л/мин, а при использовании газовой смеси — азота 15–16 л/мин, аргона 5–6 л/мин.

Особенности сварки трубопроводов из латуни. На сварку латунных трубопроводов распространяются общие рекомендации относительно очистки труб и деталей, подготовки вольфрамовых электродов, постановки прихваток, техники обрыва дуги и т.д.

Газовая сварка латунных трубопроводов из сплава Л63 выполняется окислительным пламенем при соотношении кислорода к ацетилену 1,3:1,4.

При сварке труб размером 45×3 мм используется пламя мощностью 300–450 л/ч и присадочные прутки или проволока диаметром $d_{\text{т}} \geq 3$ мм.

Необходимое соотношение газов в пламени достигается дополнительной подачей кислорода к нейтральному пламени, чтобы размеры его второй зоны и ядра уменьшились и пламя стало бы более «громким». При излишке кислорода исключаются попадание водорода из пламени в сварочную ванну и его растворение. Это уменьшает испарение цинка и предупреждает образование пор в швах. В процессе сварки нужно только оплавливать свариваемые поверхности и сразу вводить присадочный прутки, который должен содержать кремний для уменьшения испарения цинка.

Сварку целесообразно вести в нижнем положении. При нагревании деталей с разной толщиной стенок пламя направляют главным образом на более толстую или теплопроводную деталь. С целью равномерного нагревания горелкой выполняют колебательные движения, а сварное соединение и конец прутка должны находиться в защитной оболочке пламени. Охлаждение изделия проводится только на воздухе и ни в коем случае в воде.

Ручная аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом узлов трубопроводов из латуни марки ЛАМш 77–2–0,05 (трубы размером 55×3 мм) ведется на переменном токе без подогрева и без подачи защитного газа в полость трубы. Основные параметры режима: $d_{\text{WЭ}} = 4$ мм, $d_{\text{прис}} = 3–5$ мм, $I_{\text{св}} = 220–240$ А, $Q_{\text{Ар}} = 8–12$ л/мин.

Стыковые соединения свариваются за два прохода, а угловые и внахлестку — одним проходом. При сварке угловых соединений необходима плавная или ступенчатая подкантовка узла при ведении процесса только «на подъем». Соединение труб внахлестку можно осуществлять при горизонтальном (подкантовка узла) или вертикальном положении трубы, а труб с фланцами — в положении «в лодочку» или при вертикальном положении трубы. Во всех случаях начало и конец каждого участка шва перекрываются на длине 5–10 мм.

Сварка угловых соединений труб из сплава Л63 с фланцами из латуни ЛМц58–2, ЛС59–1, Л63 и кольцами из Л63 ведется

на постоянном токе прямой полярности и таких параметрах режима: $d_{W3} = 3-4$ мм, $d_{прис} = 3$ мм, $I_{св} = 150-160$ и $230-240$ А в соответствии с диаметром вольфрамового электрода; $Q_{Ar} = 8-10$ л/мин. Сварка выполняется без подогрева трубы в ее вертикальном положении. Чтобы не было прожогов в трубе, в ней размещается медная сплошная конусная пробка. В начале работы электрод направляется на фланец (кольцо), по мере их разогрева угол наклона изменяется до положения биссектрисы угла.

Особенности сварки трубопроводов из разнородных материалов
В судовых конструкциях возникает необходимость пропуска медных и медно-никелевых трубопроводов через стальные поперечные и продольные переборки, цистерны, другие емкости без потери прочности и плотности в месте соединения. Это обеспечивается при использовании специальных переборочных стаканов и фланцев при толщине стенок труб 1,5–6 мм и вварышей при толщине стенок труб 2,5–8 мм (в последнем случае только с трубами из сплава МНЖ5–1) (рис. 4.8).

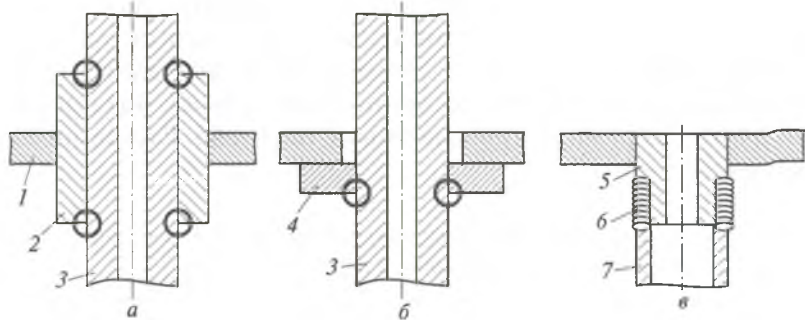


Рис. 4.8. Схема соединения стальных конструкций с медными и медно-никелевыми трубами:

1 — переборка; 2 — переборочный стакан; 3 — медная или медно-никелевая труба; 4 — переборочный фланец; 5 — вварыш; 6 — металл, наплавляемый проволокой МНЖКТ5–1–0,2–0,2; 7 — медно-никелевая труба

Технология и техника сварки должны обеспечить отсутствие сквозного проплавления и прожога трубы, получение прочных и плотных сварных швов при минимальном проплавлении стальных деталей, так как при повышенном содержании железа в сварном шве ухудшаются его коррозионные свойства.

Если медные или медно-никелевые трубы нужно сваривать с коррозионно-стойкими сталями типа 18–8, возникают дополнительные трудности, так как эти стали в контакте с расплавленной жидкой медью или ее сплавом склонны к образованию макротрещин, иногда сквозных, видимых невооруженным глазом, а сами по себе эти стали склонны к образованию горячих трещин, поэтому нужно сварку вести на минимальных сварочном токе и скорости; направлять дугу на трубу и сварочную проволоку, по возможности только оплавляя поверхность стали. Нельзя начинать наплавку с кромки стальной детали. Наплавку каждого последующего прохода можно осуществлять только после остывания детали до $T = 100^\circ\text{C}$ и меньше. При сборке узлов (рис. 4.8) необходимо добиваться, чтобы кольцевой зазор был равномерным и не превышал 0,5 мм, а при сварке трубы с проточенной частью наплавленного стального корпуса вварыша превышение облицовки трубы было менее 1 мм.

Втулки для стаканов и фланцев из углеродистой и коррозионно-стойкой стали сваривают угловыми швами вручную аргонодуговым способом с применением присадки марки МНЖКТ5–1–0,2–0,2 на постоянном токе прямой полярности на параметрах режима, приведенных в табл. 4.45. Расход аргона составляет 5–10 л/мин.

Таблица 4.45. Ориентировочные параметры режима ручной аргонодуговой сварки стальных втулок и фланцев с трубами

Толщина стенки трубы, мм	$d_{WЭ}$, мм	$d_{прис}$, мм	$I_{св}$, А, при сварке с трубами	
			медно-никелевыми	медными
1,5–2	2–3	2–3	80–90	100–110
3	3–4	3–4	100–110	120–130
4	4–5	4–5	120–130	160–180
5–6	5	4–5	130–140	180–200

Сварка в цеху выполняется в нижнем положении, а в монтажных условиях в два полуоборота — снизу вверх с перекрытием начала и конца проходов на длине 5–10 мм; дуга направлена главным образом на трубу и сварочную проволоку. Вольфра-

мовый электрод направляется по биссектрисе угла, а проволока — под углом 90° по отношению к оси электрода. При обрыве дуги кратер заправляется без присадочной проволоки с постепенным переходом на ранее выполненный шов, дуга гасится плавно, после чего еще 10–15 с необходимо защищать металл шва от воздуха. При толщине стенки медной трубы 6 мм перед сваркой ее нужно подогреть до $T = 200\text{--}500^\circ\text{C}$.

Наплавка угловых швов первого слоя, в том числе при сварке вварыша со стенкой трубы, выполняется в положении «в лодочку», другие слои накладываются в нижнем положении напроход при плавной и ступенчатой подкантовке вварыша с чередованием наплавки кольцевых валиков шва с одной и другой стороны вварыша (рис. 4.9) на параметрах режима, данных в табл. 4.46 и 4.47.

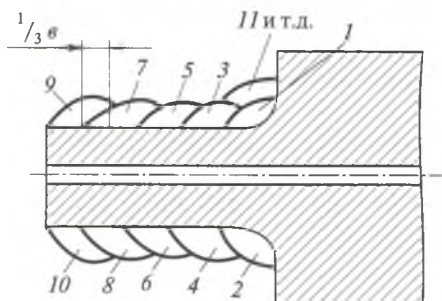


Рис. 4.9. Схема наплавки корпуса вварыша:

1–11 — последовательность наложения валиков шва; σ — ширина валика

Таблица 4.46. Ориентировочные параметры режима ручной дуговой наплавки и приварки вварышей при $Q_{Ar} = 8\text{--}10$ л/мин

Операция	d_{W3} , мм	$d_{прис}$, мм	$I_{св}$, А
Наплавка слоя:			
первого	4	4	140–150
второго	4	4	170–180
последующих	5	5	220–240
Сварка трубы с наплавленным металлом	5	3	160–170

При наплавке первого слоя дугу направляют на сварочную проволоку, последующие слои наплавляют при наклоне наплавленной поверхности под углом 15° . Каждый последующий валик как при ручной, так и при полуавтоматической наплавке

накладывают только после охлаждения вварыша до $T = 100^\circ\text{C}$, и он должен перекрывать предыдущий на $1/3$ его ширины. Наплавку корпуса вварыша можно сочетать с одновременной приваркой его к трубе, причем наплавленный валик должен перекрывать и торец трубы. Каждый наплавленный валик и весь слой тщательно зачищают. Число наплавленных слоев на вварыше должно быть не менее трех, так чтобы наплавленная поверхность после механической обработки была расположена в третьем слое или последующих. Соблюдение технологии и техники наплавочных работ обеспечивает получение качественных сварных соединений, равноценных по качеству основному (цветному) металлу.

Таблица 4.47. Ориентировочные параметры режима полуавтоматической наплавки и приварки вварышей в аргоне при $Q_{\text{Ar}} = 15\text{--}18$ л/мин

Операция	d_3 , мм	$I_{\text{св}}$, А	U_d , В
Наплавка слоя:	1	150–160	24–26
первого	1,2	240–270	25–26
второго и последующих			
Сварка трубы с наплавленным металлом	1,2	250–270	24–25

ГЛАВА 5 СВАРКА НИКЕЛЯ И ЕГО СПЛАВОВ¹

5.1. Маркировка и свариваемость никеля и его сплавов

Эти материалы обладают высокой коррозионной стойкостью в агрессивных средах, жаропрочностью, магнитоstrictionными свойствами, способностью сохранять пластические свойства при высоких и низких температурах и т.п. Из них изготовляют аппараты для приготовления и транспортирования многих химических и пищевых продуктов, электрохимии, криогенной техники и т.п.

В соответствии с ГОСТ 492–73 «Никель, сплавы никелевые и медно-никелевые, обрабатываемые давлением» они маркируются таким образом: НП1 (99,9 % Ni + Co), НП2 (99,5 % Ni + Co), НМц5 (4,6–5,4 % Mn, Ni + Co остальное), НМц2,5 (2,3–3,3 % Mn, Ni + Co остальное), НМЖМц28–2,5–1,5 (27,5–28,5 % Cu; 2,–3,0 % Fe; 1,2–1,8 % Mn, Ni + Co остальное). Согласно ГОСТ 19241–80 «Никель и низколегированные никелевые сплавы, обрабатываемые давлением», маркируются так: НМг (0,02–0,07 % Mg, Ni + Co остальное), НВ3 (2,5–3,5 % W, Ni + Co остальное).

Наиболее распространенными никелевыми сплавами, которые сваривают, являются монель-металл НМЖМц28–2,5–1,5 и нихром марки Х20Н80 (20–23 % Cr; 1,5 % Mn; 0,1 % Si; 0,5 % Fe; Ni + Co остальное).

Свариваемость никеля и его сплавов в значительной мере определяется наличием вредных примесей в свариваемом металле, которыми являются:

- ◇ углерод – его содержание ограничивается 0,15 %, но в некоторых электродных материалах для сварки никеля его содержа-

¹ Здесь не рассматриваются никелевые жаропрочные и жаростойкие сплавы, изготовленные по ГОСТ 5632–72.

ние может достигать 1 %; в этом случае он вводится в состав покрытия как активный раскислитель;

- ◇ сера, которая образует вместе с никелем эвтектику $\text{Ni-Ni}_3\text{S}_2$, располагающуюся по границам зерен. Для борьбы с ней в сплавы вводятся до 1,5 % Mn и до 0,1 % Mg, которые образуют тугоплавкие сульфиды внутри зерен; содержание серы не превышает 0,005–0,03 %;
- ◇ фосфор ухудшает свойства никеля и его сплавов, образуя эвтектику $\text{Ni-Ni}_3\text{P}$, расположенную по границам зерен, ослабляя межзеренную связь; содержание фосфора не должно превышать 0,005 %.

Стойкость шва против образования горячих (кристаллизационных) трещин снижают также висмут, свинец, сурьма, мышьяк; их содержание не должно превышать 0,002–0,005 % каждого.

Никель и его сплавы чувствительны к газам — кислороду, водороду и оксидам углерода, растворимость которых в жидком металле значительна, а в твердом металле мала, в результате чего образуются поры и возникает «водородная болезнь», как у меди. Хрупкость металла шва обусловлена образованием эвтектики Ni-NiO , расположенной по границам кристаллитов. Надежная защита плавильного пространства в сочетании с введением активных раскислителей (титана, алюминия) и дегазацией сварочной ванны обеспечивает получение качественных сварных швов.

Для измельчения структуры сварка ведется на пониженной погонной энергии с подачей в сварочную ванну элементов-модификаторов — титана, молибдена, РЗМ; наиболее эффективно комплексное модифицирование. Металл сварного шва обладает худшими литейными свойствами, обладает меньшей жидкотекучестью по сравнению со сталью, а основной металл проплавляется на меньшую глубину, поэтому требует большего угла раскрытия кромок и меньшего притупления разделки. Сплавы никеля монель-металл, нихром имеют большую литейную усадку, большее электрическое сопротивление, меньшую теплопроводность, чем никель; при сварке нихрома нужно бороться с оксидной пленкой Cr_2O_3 , которая затрудняет формирование шва. После сварки сплавы никеля с молибденом, никеля с молибденом и хромом осуществляют термиче-

скую обработку при температуре 700–800 °С с последующим охлаждением на воздухе или в воде, что позволяет получить мелкозернистую разориентированную структуру и снять сварочные напряжения.

Подготовка металла под сварку включает механическую обработку и обезжиривание, а металл с оксидной пленкой после длительного высокотемпературного нагрева требует химической обработки в различных реактивах, например: 1000 см³ H₂SO₄, 30 г NaCl. Перед травлением деталь промывают в горячей воде, затем погружают на 5–10 с в травильную ванну, после чего вновь промывают в горячей воде и нейтрализуют от остатков кислот в 1%-ном растворе аммиака.

5.2. Технология и техника сварки и наплавки никеля и никелевых сплавов

Газовая сварка никеля и никелевых сплавов обычно используется при сварке тонколистового металла толщиной до 3–4 мм при изготовлении малогабаритных изделий и осуществляется нормальным или слабовосстановительным ацетиленокислородным пламенем.

Листы толщиной до 1 мм собираются с отбортовкой кромок, металл толщиной 1–2 мм сваривается однопроводными швами без разделки кромок, для больших толщин производится V-образная разделка с углом раскрытия 70°. В качестве присадки используются никелевые прутки, содержащие до 3 % Mn, нихромовая проволока марки ЭН334, в качестве флюса — бура, а также смеси хлористых солей щелочно-земельных металлов с бурой и борной кислотой: № 1 — 100 % буры, № 2 — 25 % буры, 75 % борной кислоты, № 3 — 30 % буры, 50 % борной кислоты, 10 % NaCl, 10 % KCl. Мощность пламени составляет 120–130 л/ч на 1 мм толщины свариваемого металла.

Сварка ведется за один проход при погружении прутка в сварочную ванну без ее перемешивания, непрерывно, без задержек, чтобы избежать перегрева околошовной зоны и образования трещин. Ядро пламени должно находиться на расстоянии 3–4 мм от поверхности ванны. Сварка металла толщиной

1,5–2 мм ведется «левым» способом, больших толщин — «правым» способом. Горелку располагают под углом 90° к присадке и под углом 45° к изделию.

После сварки осуществляется термическая обработка — нормализация при $T = 825\text{--}900^\circ\text{C}$ для повышения пластичности и вязкости сварных соединений.

Сварку нихрома выполняют при небольшом излишке ацетилена пламенем мощностью 50–70 л/ч на 1 мм толщины свариваемого металла. Присадка выбирается близкой по составу к основному металлу при пониженном содержании углерода и хрома по верхней границе. В качестве флюса используют состав: 40 % буры, 50 % борной кислоты, 10 % NaCl или KF. Сварку ведут с максимально возможной скоростью и без перерывов. Следует избегать многослойной сварки и повторного расплавления шва, так как это вызывает рост зерен и образование трещин. После сварки проводят отжиг для улучшения механических свойств.

Сварка никеля и никелевых сплавов графитовым электродом ведется на постоянном токе прямой полярности и переменном токе и применяется в основном для никелевых сплавов. Нихромовые нагреватели термических печей — проволоочные и ленточные толщиной 1,5–3 мм — сваривают, как правило, без присадки. В случае необходимости применяется присадка из проволоки НМц2,5 в сочетании с флюсом на борной основе, иногда во флюс добавляют порошки алюминия, ферротитана, феррованадия. Свариваемые нихромовые проволоки скручивают на узел, ленты собирают с отбортовкой, посыпают флюсом и подвергают действию дуги до получения шарика на проволоке или шва на ленте на параметрах режима: $d_3 = 6\text{--}10$ мм, $I_{\text{св}} = 60\text{--}120$ А, $U_{\text{д}} = 22\text{--}26$ В, $d_{\text{прис}} = 1,5\text{--}3$ мм. Этот способ применяется для сварки деталей из никель-алюминиевого сплава (25 % Ni, 15 % Al, 60 % Fe — все по массе), который используется в радиотехнике. В качестве присадки выступает проволока из монель-металла, в качестве флюса — бура. Сварку ведут с предварительным подогревом до $T = 650^\circ\text{C}$, во избежание трещинообразования на постоянном токе прямой полярности: $d_3 = 6\text{--}8$ мм, $I_{\text{св}} = 160\text{--}180$ А, $U_{\text{д}} = 28\text{--}32$ В. При сварке не допускается перегрев металла, который может потерять свои магнитные свойства.

Сварка покрытыми электродами ведется на постоянном токе обратной полярности $I_{св} = (35-40)d_э$, при соединении металла толщиной более 1,5 мм. Вообще никель в качестве присадочного металла оказался очень полезным материалом для соединения металлов не только на его основе, но и для холодной и полугорячей сварки чугуна, сварки никеля со сталями, сварки разнородных плохо сваривающихся сталей и сплавов, для наплавки промежуточных буферных слоев. Для этих целей широко используются марки электродов, представленные в табл. 68.

При сварке выполняются незначительные продольные колебания концом электрода для лучшего газоудаления и получения плотных швов. Электрод располагают перпендикулярно плоскости шва с наклоном не более 15° в сторону свариваемых кромок. При толщине металла более 15 мм требуется предварительный подогрев до $T = 200-250^\circ\text{C}$. Сварка выполняется за один проход. В случае многослойных швов требуется тщательная зачистка поверхности промежуточных швов. Для уменьшения сварочных деформаций длинные швы рекомендуется выполнять участками с разрывами между ними, которые завариваются после зачистки от шлака; сварка ведется на медных подкладках. После сварки проводится термическая обработка при $T = 825-900^\circ\text{C}$ с охлаждением на воздухе для снятия сварочных напряжений.

Дуговая сварка никеля и никелевых сплавов вольфрамовым электродом ведется на постоянном токе прямой полярности или на переменном токе в аргоне на параметрах режима, приведенных в табл. 69, и применяется для изготовления изделий толщиной до 10 мм. Подготовка кромок такая же, как и при сварке покрытыми электродами. Получение качественных швов обеспечивается применением присадочных материалов, содержащих раскислители и нитридообразующие элементы, составы которых приведены в табл. 70.

Сварка ведется «левым» способом на большой скорости с минимальными поперечными колебаниями горелки. Угол наклона горелки к оси шва не больше 60° , а присадка подается под углом $20-30^\circ$ к оси шва. При многослойной сварке последующие швы накладываются после полного охлаждения предыдущих швов, их зачистки и обезжиривания.

Механизированная аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом выполняется на параметрах режима, приведенных в табл. 5.1.

Таблица 5.1. Ориентировочные параметры режима механизированной аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом тонколистовых никелевых сплавов (расход аргона 8–10 л/мин)

Толщина металла, мм	Сварка без присадки			Сварка с присадкой		
	$I_{св}, A$	U_d, B	Число проходов	$I_{св}, A$	U_d, B	Число проходов
1,5	—	—	—	85–90	10–12	1
2,0	100–120	10–12	1–2	120–150	10–12	1–2
3,0	170–200	13–15	2	190–200	12–14	2
4,0	230–250	14–17	2	—	—	—

Механизированная сварка и наплавка плавящимся электродом ведется на постоянном токе обратной полярности и применяется как для сварки металла толщиной более 5 мм, так и для нанесения специальных слоев на стали и чугуны. Сварка в защитных газах осуществляется в среде аргона, а также в его смеси с 20 % водорода, что значительно улучшает качество шва, но усложняет применение этой технологии и связано с опасностью использования водорода. Присадкой является проволока марки НМц2,5, а также приведенные в табл. 70.

Сварка ведется на постоянном токе обратной полярности на параметрах режима, данных в табл. 5.2. Расход аргона при полуавтоматической сварке 14–16 л/мин, при автоматической — 25–30 л/мин. В случае использования гелия расход увеличивается соответственно в 1,4–1,6 раза.

Таблица 5.2. Ориентировочные параметры режима механизированной сварки никеля и его сплавов в аргоне плавящимся электродом

Толщина металла, мм	$d_3, мм$	$I_{св}, A$	U_d, B	$V_{св}, м/ч$
6	3	300–340	24–26	—
10	3	360–400	26–28	20–22
14	3	420–460	28–30	18–20
18	3	480–500	30–34	17–19
22	4	480–500	30–34	16–18

Процесс сварки начинается и заканчивается на специальных технологических планках из того же самого материала с кромками, подготовленными, как и свариваемый металл. Формирование корня шва осуществляется на медных подкладках или флюсовых подушках.

Автоматическая сварка под флюсом применяется для металла толщиной более 5 мм. При толщинах металла от 6 до 12 мм выполняется V-образная разделка с притуплением 1–2 мм и зазором 0,5–2,5 мм, а при толщинах 12–20 мм эти величины составляют соответственно 2–4 и 1,5–3 мм. В всех случаях угол раскрытия кромок 60–70°. При сварке с полным проплавлением кромок применяются медные подкладки или флюсовые подушки.

Сварка под флюсом ведется как с использованием стандартных плавящихся флюсов марок АН-348А, АН-20, АНФ-5 в сочетании с проволоками из табл. 70, так и под специальным керамическим флюсом ЖН-1 (15 % Al_2O_3 , 60 % CaF_2 , 12 % CaCO_3 , 5 % Мп, 2 % Ti, 6 % Al) с проволоками марок НП1 и НП2, на постоянном токе обратной полярности на параметрах режима, данных в табл. 5.3.

Таблица 5.3. Ориентировочные параметры режима автоматической сварки никеля под керамическим флюсом марки ЖН-1 (напряжение на дуге 30–34 В)

Толщина металла, мм	d_3 , мм	$I_{\text{св}}$, А	$V_{\text{св}}$, м/ч
6	3	350–370	22–24
7	4	400–430	24–26
8	4	420–450	23–25
9	4	440–470	22–24
10	4	460–490	21–23
	5	520–560	24–26
11	4	480–510	20–22
	5	550–590	23–25
12	4	500–530	19–21
	5	580–620	22–24

Для предупреждения чрезмерного роста зерна сварка ведется швами небольшого сечения при их медленном охлаждении.

Наплавка никелевых сплавов на сталь и чугун применяется с целью получения биметаллических конструкций с поверхностным слоем, имеющим особые свойства. Наплавка медно-никелевого сплава типа «монель» на сталь ведется под флюсом АН-26 или в аргоне проволокой марки НМЖМц28–2,5–1,5 диаметром 3 мм на параметрах режима: $I_{\text{св}} = 200\text{--}220 \text{ А}$, $U_{\text{д}} = 24\text{--}26 \text{ В}$, $V_{\text{св}} = 12 \text{ м/ч}$. Поверхностные дефекты и трещины на чугунных деталях заправляются с использованием самозащитной цельнотянутой проволоки ПАНЧ-11, которая обеспечивает получение никелевого металла на параметрах режима $d_0 = 1\text{--}1,2 \text{ мм}$, $I_{\text{св}} = 230\text{--}250 \text{ А}$, $U_{\text{д}} = 28\text{--}30 \text{ В}$.

Электрическая контактная сварка применяется в основном по отношению к сплавам никеля — нихрому, монелю, инконелю и др., в то время как чистый никель из-за большой электрической проводимости (этот показатель находится между значениями для меди и стали) сваривается хуже. Чтобы не допустить перегрева сплавов никеля при точечной сварке, выбирают меньшие токи, большие давления на электроды и повышенное охлаждение зоны сварки; последнее достигается погружением электродов и изделия в воду или охлаждением струей воды. Из-за повышенного давления электроды выполняют из сплавов высокой твердости; они имеют плоскую торцевую поверхность, а их диаметр выбирается в зависимости от толщины свариваемого металла:

Толщина металла, мм	0,5–1,5	1,5–2,5	2,5–3
Диаметр электрода, мм	3–6	6–8	8–10

Другие параметры режима приведены в табл. 71.

Стыковая сварка может осуществляться как сопротивлением, так и оплавлением, однако в связи со склонностью к росту зерна необходимо ограничивать продолжительность пребывания металла при высокой температуре и повышенной пластической деформации. Сплавы никеля, содержащие хром и алюминий, в связи с образованием оксидных пленок требуют предварительного подогрева, который уменьшает необходи-

мые давления и большие конечные скорости оплавления и осадки.

Параметры режима стыковой и шовной сварки никелевых сплавов можно применять такими, как рекомендовано для сварки титана, с некоторой коррекцией (табл. 1.26). Тонкие никелевые проволоки можно сваривать встык на сварочных машинах для конденсаторной сварки по параметрам режима (табл. 46); на тех же машинах можно сваривать очень тонкие листовые конструкции (табл. 1.24).

Диффузионная сварка никеля и его сплавов применяется при изготовлении изделий, работающих при $T = 975^\circ\text{C}$. Так, сварка сплавов НП1 и НП2 ведется на параметрах режима: $T = 1000^\circ\text{C}$, $P = 15\text{ МПа}$, $t = 10\text{ мин}$; относительная деформация составляет 0,72 %. Монель-металл сваривается при $T = 900^\circ\text{C}$ и $t = 15\text{ мин}$.

Качественное сварное соединение обеспечивается при условии предварительной механической обработки свариваемых поверхностей высокого класса.

Никель также часто применяют в качестве промежуточных прослоек в виде тонких пластин или высокодисперсного неотожженного порошка при диффузионной сварке никелевых сплавов со сталями или плохо сваривающихся между собой разнородных сплавов. Использование прослоек из порошка дисперсностью 1 мкм способствует легкому созданию физического контакта и позволяет существенно снизить температуру сварки.

ГЛАВА 6 СВАРКА СВИНЦА

6.1. Особенности сварки свинца

Свинец отличается высокой коррозионной стойкостью в некоторых чрезвычайно агрессивных средах, применяется в электротехнике и антифрикционных сплавах. Вследствие низкой прочности самостоятельные металлоконструкции из свинца не изготавливают, а используют в качестве плакирующего материала, которым облицовывают стальные, бетонные и даже деревянные емкости — различные сосуды, баки и другие аппараты для получения, хранения и транспортирования агрессивных химических веществ, а также оболочки кабелей. Свинец и его полуфабрикаты маркируются, согласно ГОСТ 3778—98, например, так: С 000 (99,99 % Pb), С1 (99,98 % Pb), С3 (99,9 % Pb).

Трудности при сварке свинца обусловлены его низкой температурой плавления (327°C), высокой жидкотекучестью и наличием тугоплавкой ($T_{\text{пл}} = 888^{\circ}\text{C}$) оксидной пленки PbO , которая засоряет сварочную ванну, а пары этого оксида являются чрезвычайно вредны для здоровья сварщика. При нагреве свинец склонен к росту зерна, поэтому металл шва имеет крупнокристаллическую малопластичную структуру. Для улучшения свойств основной и присадочный металл модифицируют кальцием, оловом и селеном. Вредной примесью в свинце является сурьма, которая способствует его охрупчиванию.

Перед сваркой кромки и участки металла, прилегающие к ним на расстояние 30—40 мм, зачищают металлическими щетками и подвергают травлению в растворе уксусноокислого аммония, в 10—40%-ном растворе уксусной кислоты или промыванию в четыреххлористом растворе углерода.

Для защиты сварочной ванны от окисления применяют флюс, состоящий из 50 % стеарина и 50 % канифоли и исполь-

зуемый при сварке листов толщиной свыше 6 мм; для меньших толщин достаточно стеарина. Флюс наносится как на свариваемые кромки, так и на прутки, а сварку ведут в нижнем или вертикальном положении. В последнем случае используют специальные формирующие кристаллизаторы. Перед сваркой кромки и прилегающие участки подвергают механической и химической обработке.

6.2. Технология и техника сварки и наплавки свинца

Газовая сварка выполняется нормальным ацетилено-кислородным пламенем, при расходе 15–20 л/ч на 1 мм толщины, в качестве присадки используются круглые свинцовые прутки или «лапша» длиной 300–350 мм, нарезанная из листов. Диаметр присадки выбирается в зависимости от толщины свариваемого металла и составляет 2–2,5 его толщин, но не более 10 мм. Обычно листы сваривают встык. При толщине до 1,5 мм сварку ведут с отбортовкой и без присадки; при толщине от 1,5 до 6 мм листы сваривают без разделки и с минимальными зазорами; при толщине более 6 мм выполняют V-образную разделку с углом раскрытия 60–70°.

Сварка ведется «левым» способом: 1) создаются отдельные ванночки (капли) при одновременном нагреве основного и присадочного металла до начала расплавления; 2) горелка отводится в сторону до стекания капли присадки на расплавленный металл кромок, и шов образуется из отдельных, перекрывающих друг друга участков; 3) оксиды свинца, всплывающие на расплавленную пленку флюса, пламенем горелки удаляются с места сварки. При многопроходной сварке первый шов выполняется без присадки.

Графитовым электродом сварку свинца ведут на постоянном токе прямой полярности без разделки кромок при толщине до 6 мм; для более толстого металла выполняют V-образную разделку с притуплением 4 мм и углом 70°; процесс сварки выполняется за несколько проходов на параметрах режима, приведенных в табл. 6.1.

Таблица 6.1. Ориентировочные параметры режима сварки свинца графитовым электродом

Толщина металла, мм	$d_э$, мм	$d_{прис}$, мм	$I_{св}$, А	U_d , В
1–5	3–6	2–4	25–40	10–11
5–10	6–8	5–8	40–65	10–11
10–15	6–8	7–8	65–95	10–11
15–20	8–10	7–8	95–100	10–12

При работе в монтажных условиях рекомендуется закладывать в зазор стыка присадки для предупреждения вытекания сварочной ванны и повышения производительности. Сварка ведется на большей, чем при газопламенной, скорости, без перерывов. При случайном обрыве дуги процесс продолжается после зачистки до металлического блеска кратера и прилегающих участков металла. Графитовый электрод устанавливают под прямым углом к изделию, а присадку — под углом 30–45° к поверхности листа. Сразу после сварки рекомендуется проковка шва.

Сварка вольфрамовым электродом — наиболее производительный процесс изготовления изделий из свинца в различных пространственных положениях. Металл малых толщин (до 3 мм) сваривают на постоянном токе прямой полярности (табл. 6.2). Этот процесс используют при автоматической наплавке свинца на сталь.

Таблица 6.2. Ориентировочные параметры режима ручной аргонодуговой сварки свинца вольфрамовым электродом (толщина листа 1–3 мм, диаметр присадки 2–3 мм)

Положение и вид шва	$d_{Wэ}$, мм	$I_{св}$, А	Q_{Ar} , л/мин
Нижнее, стыковой	1,5	12–15	1,5–2
Вертикальное и потолочное, стыковой	1	8–10	1,5
Горизонтальное, внахлестку	1,5	12–15	1,5–2
Вертикальное, внахлестку	1	8–10	1,5

Перед наплавкой стальной лист подлежит лужению. Присадка вводится в дугу под углом 15–20° к горизонтали сбоку

вольфрамового электрода так, чтобы дуга горела и на присадке, и на облуженной поверхности изделия. Наплавка ведется на постоянном токе прямой полярности и параметрах режима: $d_{w_3} = 3$ мм, $d_{\text{прис}} = 6$ мм, $I_{\text{св}} = 120-180$ А, $Q_{\text{Аг}} = 12$ л/мин. При этом получают валики толщиной 3–5 мм и шириной 12–15 мм. По сравнению с газовой наплавкой производительность выше в 5–7 раз и значительно лучше условия труда сварщика.

Эффективно сварка свинца толщиной 3–5 мм реализуется с помощью импульсно-дугового процесса: швы нахлесточные в вертикальном положении без присадки с оплавлением верхней кромки листа и стыковые в нижнем положении с присадкой. Поскольку сварка выполняется отдельными точками, на проплавляющую способность дуги влияет шаг точек, который выбирается в зависимости от толщины металла: шаг 2,5–3, 2 мм при толщине металла 3 мм, шаг 1,5–2,5 мм при толщине 5 мм. Для получения необходимого проплавления форма импульса тока должна быть близка к прямоугольной. Параметры режима приведены в табл. 72.

Холодная сварка свинца применяется для металла малых толщин 2–2,5 мм. Минимальная деформация 84 %, при использовании дополнительного сдвига необходимая прочность достигается при меньшей деформации — 50 %. В связи с отсутствием эффективного наклепа в зоне холодной сварки точечные и шовные соединения свинца обладают низкой прочностью.

Стыковая сварка на оптимальных режимах позволяет получить равноценное с основным металлом соединение.

ГЛАВА 7 ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ В СОСТАВЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

7.1. Особенности металлических композитных материалов

Композитные материалы (КМ) позволяют реализовать комплекс противоположных свойств — высокую прочность и жесткость при растяжении и сжатии с высокими показателями выносливости и работы разрушения в сочетании с низким удельным весом. Металлическая матрица передает нагрузку на несущие волокна, нитевидные кристаллы, частицы и т.п., препятствует распространению трещин, формирует волокна и защищает их от внешнего воздействия.

В качестве матриц для металлических КМ чаще всего используются алюминий, магниевые сплавы, титан, никель и кобальт. Как наполнители применяются высокопрочные высокомодульные волокна, нитевидные усы, частицы карбидов и оксидов металлов, дисперсионно-упрочняющие компоненты, псевдосплавы и т.д. Они отличаются высокой температурой плавления, минимальной растворимостью в матрице, придавая КМ специальные свойства. В матрице дисперсионно-упрочняемых КМ равномерно распределены мелкодисперсные частицы другого вещества. При нагружении все усилия воспринимает матрица, в которой множество практически неразтворимых частиц упрочняющей фазы создает структуру, эффективно противостоящую пластической деформации.

Среди металлических КМ наибольшее распространение получили алюминиевые и магниевые сплавы, армированные борными волокнами, марок ВКА-1, ВКА-2, ВКМ-1, углеродными волокнами ВКУ-1, стальными проволоками марок КАС-1, КАС-1А; КМ на медной основе с волокнами ниобия, арматурой из вольфрама или молибдена; КМ с матрицей из ти-

тана и его сплавов, армированной волокнами карбида кремния, бора, углерода, стальными проволоками и т.д.

При создании современных объектов в авиастроении, ракетной и космической технике возникает необходимость использовать не только отдельные узлы из КМ, которые часто сами получают методами сварки, но и их соединения между собой, а также с однородными материалами, что связано с определенными трудностями, рассмотренными ниже:

- ◇ температура плавления матрицы составляет 600—1700 °С, а упрочнителя 1500—2500 °С, что при сварке плавлением приводит к нарушению целостности упрочнителя; кроме того, возможна реакция между ним и матричным сплавом, следствием чего может быть насыщение сварного шва газами и создание хрупких интерметаллидных фаз;
- ◇ армирование матричного сплава изменяет характер распространения в нем теплоты, что зависит от расположения волокон и их объемной доли. Поэтому требуется строгий контроль введения теплоты при сварке, что достигается присадкой электродного металла, который, расплавляясь, защищает верхние слои упрочнителя от действия высокотемпературного источника нагрева, проникает и смачивает нижележащие волокна. Некоторые волокнистые материалы, например бор, графит, Al_2O_3 , не смачиваются присадочными металлами, совместимыми с матричным сплавом. Сварка таких КМ ведется с зазором и присадками. Проблема плохой смачиваемости углеродных волокон решается путем дополнительного введения в сварочную ванну цинка или хрома, которые, взаимодействуя с углеродными волокнами, образуют карбиды, обладающие лучшей смачиваемостью;
- ◇ значительное различие коэффициентов теплоемкости, теплопроводности и линейного расширения матрицы и упрочнителя приводит к образованию температурных напряжений, которые возникают даже при сварке давлением без подогрева вследствие разных модулей упругости составляющих компонентов;
- ◇ в отличие от традиционных материалов прочность КМ зависит от непрерывности волокон по всей площади в направлении, перпендикулярном основной оси напряжений, а при нарушении этого условия при сварке почти полностью теряются механические свойства КМ;

- ◇ при сварке деталей с накладками или внахлестку вследствие концентрации напряжений ухудшаются механические свойства и увеличивается масса изделия.

7.2. Технология, техника сварки и наплавки металлических КМ

Способ, технология и техника сварки должны обеспечить получение беспористого сварного соединения без потери прочности и расплавления упрочнителя, без взаимодействия компонентов КМ между собой.

Сварка плавлением является наиболее технологичным соединением КМ, но и очень сложным в связи с расслоением в околошовной зоне и пористостью. Условия сварки должны предусматривать следующие условия.

1. Способы сварки и параметры режима должны обеспечивать минимальное тепловложение.
2. Сварку плавлением можно применять только для КМ, которые составлены из совместимых компонентов, например легких сплавов, армированных керамическими наполнителями или имеющими барьерные покрытия.
3. Следует применять присадочные материалы или промежуточные прокладки с легирующими добавками, которые ограничивают растворение армирующего компонента и создание хрупких продуктов межфазного взаимодействия в процессе сварки и дальнейшей эксплуатации сварных узлов. Так, при сварке композитных узлов систем Al-SiC , Al-C целесообразно использовать присадки с большим содержанием кремния, циркония, титана или других карбидообразующих элементов, устраняющих образование карбида Al_4C_3 , а при сварке КМ $\text{Al-Al}_2\text{O}_3$ – присадок с магнием.
4. Для получения равнопрочности при сварке дисперсионно-упрочняемых КМ целесообразно использовать присадки с керамическими компонентами с объемной долей 15–25 %.
5. Волокнистые и слоистые КМ целесообразно сваривать внахлестку при соотношении толщины покрытия к толщине мате-

риала более 20; такие швы можно дополнительно усилить болтовыми или заклепочными соединениями.

Армированные частицами, короткими волокнами, нитевидными кристаллами КМ можно сваривать встык при условии, что они изготовлены методами жидкофазной технологии. Если они изготовлены методами порошковой металлургии, то в зоне сварки образуются участки повышенной пористости и прочность таких соединений снижается. Поэтому перед сваркой необходимо проводить вакуумную дегазацию для удаления водорода.

В зависимости от особенностей межфазного взаимодействия компонентов можно установить критерии свариваемости КМ. Так, если компоненты КМ при плавлении создают однородную жидкость, а в твердом состоянии взаимно практически нерастворимы (системы Al–Be, Ti–Mg), после кристаллизации образуется однородная гетерогенная структура с чередующимися частицами матрицы и упрочнителя. При сварке плавлением таких материалов получается сварной шов со свойствами, практически не отличающимися от свойств основного металла.

Если компоненты при расплавлении и кристаллизации имеют ограниченную или неограниченную растворимость (системы Ni–W, Al–Si), образуются твердые растворы с эвтектикой, перитектикой или с плавно изменяющейся концентрацией. При этом свойства сварного шва также близки к свойствам основного металла.

В случае, если компоненты КМ вообще не взаимодействуют при сварке в связи с большой разницей в температурах плавления (системы Al–Be–Mg, Fe–Cu–Pb), они свариваются плохо и необходимо использовать специальные приемы, устранивающие испарение более легкоплавкого компонента.

Если компоненты КМ не смешиваются в жидком состоянии (системы Al–Pb, Fe–Cu–Pb), сварка их невозможна, сварные соединения легко разрушаются по зоне сплавления.

Дуговая сварка вольфрамовым электродом в среде защитных газов используется чаще всего. При сварке стыковых соединений КМ типа ВКА эффективно применение специальных промежуточных расплавляемых проставок из алюминиевых сплавов типа АМг6, 1420, 1201, которые часто имеют $\perp$ -образную форму. Свариваемые детали вместе с вращающимся электро-

дом закрепляются в подвижном локальном зажимном устройстве, а сварка ведется на формирующей подкладке с канавкой специальной формы. Радиус вращения электрода выбирается в зависимости от ширины технологических проставок и толщины плакирующего слоя на материале. Листы толщиной 1,2 мм из КМ ВКА-2 сваривают вдоль волокон в среде гелия через промежуточную Т-образную расплавляемую вставку, изготовленную из высокопрочного алюминиевого сплава (рис. 7.1). При этом обеспечиваются необходимое проплавление вставки на всю высоту шва, уменьшение зоны термического влияния, высокая скорость нагрева и охлаждения металла, улучшение структуры шва, а прочность составляет 80–95 % прочности матричного материала.

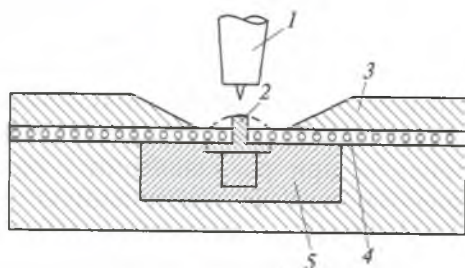


Рис. 7.1. Схема сварки листового КМ ВКА-2 через промежуточную расплавляемую Т-образную вставку:

1 — горелка; 2 — вставка; 3 — медный прижим; 4 — КМ; 5 — медная подкладка

При сварке КМ толщиной 1–3 мм с матрицей из алюминиевого сплава 1330, армированного борными волокнами диаметром 0,14 мм (ВКА-2) и с матрицей из сплава 1340, армированного стальной проволокой диаметром 0,15 мм (КАС-1А), процесс ведется при соединении встык вдоль направления армирования со вставкой из сплава АМгб и присадочным материалом СВАК5 в импульсном режиме: $I_{\text{имп}} = 50\text{--}60$ А на 1 мм толщины КМ, $I_{\text{паузы}} = 20\text{--}25$ А, частота 2–10 Гц, $V_{\text{св}} = 5\text{--}10$ м/ч.

При сварке дисперсионно-упрочняемого КМ Al + SiC с использованием присадочных материалов возникают дополнительные трудности — разбавление сварочной ванны, переход упрочняющих компонентов в сварной шов и их неравномерное распределение. Интенсивный сварочный нагрев разруша-

ет частицы SiC и способствует созданию крупных пластин Al_4C_3 , что ухудшает механические свойства КМ. Сварку КМ $\text{AlMg5} + 12\text{--}20\% \text{SiC}$ толщиной 3 мм ведут вольфрамовым электродом на переменном токе с присадкой из сплава типа AlMg на параметрах режима: $I_{\text{св}} = 150 \text{ А}$, $V_{\text{св}} = 10\text{--}12 \text{ м/ч}$. Хотя швы, выполненные без присадки, более прочные, однако швы, полученные с присадкой, а также термически обработанные швы обладают удовлетворительными прочностными характеристиками на уровне 0,85 прочности основного материала благодаря более равномерному распределению армирующего наполнителя.

При сварке КМ алюминиевый сплав $+ 20\% \text{Al}_2\text{O}_3$ рекомендуется использовать присадку из матричного сплава с 5 % Mg , что способствует лучшему распределению Al_2O_3 в металле шва; этот же материал можно применять в качестве плавящегося электрода; после сварки изделие рекомендуется подвергать термической обработке.

Для увеличения текучести сварочной ванны при одновременном повышении количества упрочняющих частиц и гарантированного проплавления корня шва присадочная проволока марки АК5 может быть размещена в разделке, угол которой равен 90° .

Для получения КМ $\text{Ti} + 20\% \text{W}$ проводят следующие операции. Вольфрамовые нити диаметром 0,2 мм укладывают с двух сторон на титановый лист толщиной 0,43 мм и закрывают такими же титановыми листами с двух сторон, так что суммарная толщина образованного «сэндвича» составляет 1,7 мм. Затем листы соединяются диффузионной сваркой в вакууме на параметрах режима: $T = 870^\circ \text{C}$, $P = 7 \text{ МПа}$, $t = 1 \text{ ч}$. Дуговая сварка осуществляется вольфрамовым электродом в аргоне вручную на параметрах режима $I_{\text{св}} = 60 \text{ А}$, $U_{\text{д}} = 10 \text{ В}$ и механизированным способом $I_{\text{св}} = 25 \text{ А}$, $U_{\text{д}} = 12 \text{ В}$, $V_{\text{св}} = 15 \text{ м/ч}$ без присадки. Перед сваркой кромки обрабатываются так, чтобы волокна равномерно подходили к их торцам.

Сварка плавящимся электродом в среде защитных газов позволяет регулировать состав сварного шва. Свариваемые детали из КМ $\text{Al} + 18,4\%$ (по объему) карбида кремния собираются встык с зазором для обеспечения полного провара в стыковом соединении с зазором. Сварка ведется плавящимся электро-

дом типа АМгЗ на постоянном токе обратной полярности в аргоне на параметрах режима: $I_{\text{св}} = 100\text{--}110$ А, $U_{\text{д}} = 19\text{--}20$ В, $V_{\text{св}} = 18\text{--}22$ м/ч, $Q_{\text{Аг}} = 16\text{--}19$ л/мин. Прочность сварных швов превышает этот показатель для деформируемых алюминиевых сплавов. Однако вследствие действия сварочной дуги часть волокон выбрасывается из сварочной ванны. Поэтому для компенсации потерь армирующий материал дополнительно подают с помощью специального устройства в низкотемпературную хвостовую часть ванны. Другие варианты способа предполагают предварительное нанесение на свариваемые кромки смеси армирующего материала, порошка матрицы, связующего вещества и легирующих добавок, которые способствуют смачиванию волокон или, наоборот, сдерживают его. В качестве связующего используются клеи, пасты, этиловый спирт в количестве 50–80 % (по объему) относительно волокон. Можно также использовать специальный плавящийся электрод, который содержит металл матрицы или подобный ему, смесь металла матрицы и волокна и по своей конструкции напоминает порошковую проволоку.

Таким же образом соединяют встык листы толщиной 12,7 мм с КМ с объемной частью магниевого сплава 41 % и волокон Al_2O_3 на параметрах режима: $I_{\text{св}} = 90\text{--}100$ А, $U_{\text{д}} = 20\text{--}22$ В, $Q_{\text{Аг}} = 5$ л/мин. В качестве плавящегося электрода используется трубка магниевого сплава со смесью матричного порошка с волокнами Al_2O_3 из расчета 17 % (по объему) в металле шва. Сварка ведется с предварительным подогревом до 400 °С. Для компенсации выбросов волокон из сварочной ванны их можно вводить инъекцией или с помощью специального устройства (рис. 7.2). Оно состоит из кожуха 1 со шнеком 2, вращающимся вручную или с помощью механического привода, для подачи армирующего порошкообразного материала 3 через жаропрочное керамическое сопло 4, откуда материал в виде струи 5 поступает в ванну. Скорость подачи определяется размером ванны и необходимым соотношением волокон и металла матрицы в сварном шве. При этом большое количество частиц в ванне может привести к увеличению вязкости расплавленного металла, что ухудшит жидкотекучесть и смачивание. Концентрация волокон находится в пределах 12–20 %

(по объему), а для интенсификации смачивания вводятся разные добавки, снижающие силы поверхностного натяжения.

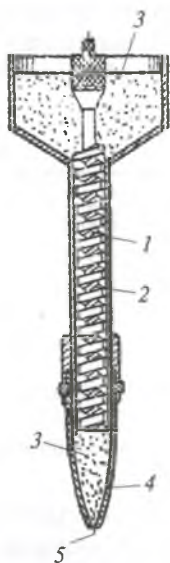


Рис. 7.2. Схема устройства для подачи присадочного армирующего материала в сварочную ванну

Электронно-лучевая сварка предполагает использование промежуточных прослоек. Например, в стыковом соединении из КМ магниевый сплав + 20% Al_2O_3 применяется прослойка толщиной 0,5 мм из матричного сплава. При сварке КМ алюминий + 22%SiC используются промежуточные проставки таврового или двутаврового профиля с 5–10 % дополнительных элементов кремния, никеля, хрома и др. Сварку ведут на параметрах режима: $I_{\text{св}} = 20\text{--}30$ мА, $f = 5\text{--}10$ Гц, $V_{\text{св}} = 20\text{--}30$ м/ч.

Комбинированные способы сварки. При стыковом соединении бороволокнистых труб диаметром 120 мм и толщиной стенки 3 мм используются гомогенные переходники из сплава марки 01980, которые диффузионной сваркой привариваются к трубам, после чего выполняется сварка гомогенной вставки электронным лучом с формированием корня шва на подкладке (рис. 7.3), предотвращающей вытекание расплавленного металла из сварочной ванны и обеспечивающей получение сварного шва без корневых дефектов, характерных для этого способа сварки с несплошным проплавлением.

Детали собирают и закрепляют в цанговом приспособлении, соединенном с приводом вращения изделия установки ЭЛУ-5. Зазор не более 0,1 мм, поперечное биение стыка относительно пучка составляет $\pm 0,15$ мм. Сварка ведется на параметрах режима: $I_{\text{п}} = 45\text{--}46$ мА, $U_{\text{уск}} = 52$ кВ, $V_{\text{св}} = 20$ м/ч.

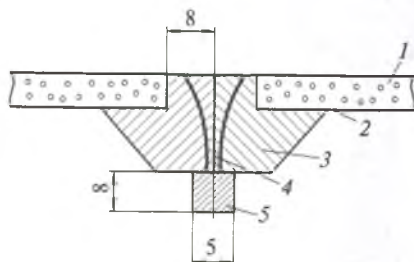


Рис. 7.3. Схема соединения бороволокнистых труб, собранных под электронно-лучевую сварку:

1 — стенка трубы; 2 — диффузионное соединение; 3 — переходник; 4 — сварной шов; 5 — подкладка

При оплавлении матрицы волокнистого материала, полученной путем плазменного напыления, в сварном шве образуются поры, которые можно ликвидировать выполнением 2–3 проходов на одном и том же режиме. При малой массе деталей каждый последующий проход выполняют после полного охлаждения детали, что предотвращает вспучивание матрицы в околошовной зоне.

Комбинированный способ используется также с целью облегчения головок поршней двигателей внутреннего сгорания и повышения их износостойкости в условиях термической усталости. В центральной части отлитой силуминовой заготовки выполняется углубление диаметром 70 мм и глубиной 2 мм. По его размеру изготавливается КМ на алюминиевой основе с керамическим порошком на основе карбида кремния. При выборе материалов пары деталь–вкладыш принимают во внимание малую разницу между коэффициентами термического расширения, но у вкладыша он должен быть немного больше, чем у детали, для предупреждения напряжений сжатия со всех сторон. Поверхности основного металла и вкладыша зачищают путем погружения в щелочной раствор, где они 10 мин обрабатываются ультразвуком. После этого вкладыш размещается в

и обваривается по периметру электронным лучом в вакууме с целью получения изолированного от внешней среды зазора между вкладышем и деталью. Получение сварного соединения осуществляется диффузионной сваркой в среде аргона под давлением 20–150 МПа при температуре 400–500 °С в течение 3 ч. Данное соединение подвергается упрочняющей термической обработке: закалке в жидкой среде при $T = 500$ °С в течение 3 ч с дальнейшим отпуском 6 ч при $T = 180$ °С.

Сварка диспергированным металлом осуществляется за счет электронно-лучевого расплавления присадочного металла с боковой поверхности вращающегося с частотой 1800–3100 об/мин диска — цилиндрической заготовки из сплава АЛ25 диаметром 160 мм. Измельченные капли расплавленного металла переносятся на предварительно нагретые до температуры $(0,5–0,65)T_{пл}$ формообразующие поверхности, где происходит их кристаллизация на подготовленных свариваемых кромках (рис. 7.4).

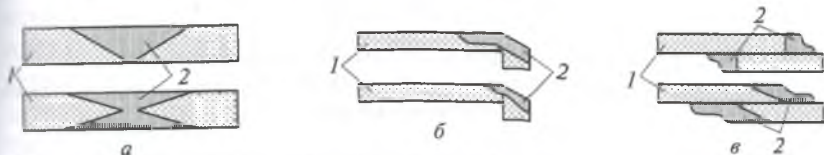


Рис. 7.4. Схема сварки с использованием диспергированного расплава стыковых (а), угловых (б) и нахлесточных (в) соединений КМ:

1 — основной металл; 2 — присадочный металл

Управление пучком луча осуществляется прибором дискретной развертки с набором траекторий сканирования, что создает разные условия распределения плотности энергии пучка в зоне нагрева и получения необходимого объема расплавленного металла и размеров жидких капель, переносимых центробежной силой к изделию. В отличие от сварки с оплавлением кромок в матричном материале частицы упрочнителя не расплавляются, а их связь с матричным материалом не нарушается.

Плазменное напыление может быть использовано при сварке КМ алюминиевый сплав + 10–20% SiC. Предварительно V-образно разделанные и подготовленные под напыление кромки собираются без зазора (рис. 7.5). На лицевой поверхности соз-

дается необходимая шероховатость для лучшего сцепления с основным металлом. Напыление ведется порошком на основе алюминиевого сплава 15 % SiC (по объему), диаметр гранул которого составляет 45–150 мкм. Мундштук плазменной горелки совершает обратно-поступательные движения со скоростью 0,21 м/с перпендикулярно деталям, предварительно подогреваемым до $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$; его расстояние от поверхности составляет 95 мм. Напыление ведется на всю высоту свариваемых деталей.

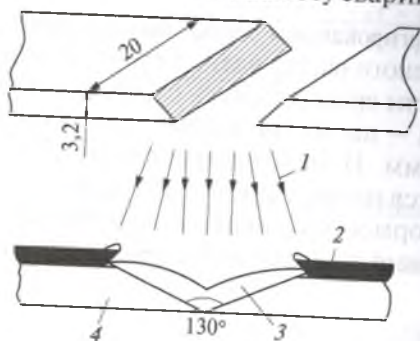


Рис. 7.5. Схема процесса сварки КМ напылением:

1 — напыленные частицы; 2 — защитные пластины; 3 — напыленный материал;
4 — основной материал

Для улучшения качества соединения, снижения микрористости и увеличения прочности детали вместе со швом 1 ч подвергаются изостатическому прессованию при $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 103\text{ МПа}$, после чего их термически обрабатывают 18 ч — закалкой и старением при $T = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$. Несмотря на уменьшение содержания карбида кремния в напыленном слое вследствие термического разложения в плазменной струе, прочность соединения благодаря термической обработке возрастает вдвое по сравнению с этим показателем после напыления.

Способы сварки давлением обеспечивают хорошие результаты вследствие меньшей подводимой энергии, благодаря чему можно уменьшить смещение или дробление армирующих компонентов.

Для устранения деформации изделий применяются специальные термофиксирующие устройства, которые зачастую предусматривают и термическую обработку изделий.

При электрической контактной сварке КМ имеет место снижение теплопроводности и электрической проводимости по сравнению с материалом матрицы, что препятствует формированию литого ядра. Это обстоятельство преодолевается за счет выбора электродов с разной проводимостью, обжатия периферийной зоны, смены диаметра и радиуса закругления электродов, использования промежуточных прокладок. Так, при сварке КМ системы Al—SiC применяются прокладки толщиной 0,5 мм из сплавов Al + 3%Mg, Al + 12%Si. Наличие в структуре материала составляющих с разными свойствами вносит особенности в формирование сварной точки. Например, при сварке однонаправленного КМ ВКА-1, характеризуемого анизотропией механических свойств вдоль и поперек волокна, контактные площадки деталь—деталь и электрод—деталь имеют эллипсообразную форму. Чем выше содержание волокон бора, тем больше разница диаметров сварной точки вдоль и поперек волокна. Если при содержании бора 20 и 33 % образуются практически круглые точки, то при содержании бора 51 % отношение диаметров точки вдоль и поперек волокна составляет 0,8:7,0. С увеличением объемной доли волокон бора в материале его деформационная способность снижается. Это затрудняет процесс изгиба деталей и приводит к тому, что контактная площадка деталь—деталь приобретает нечетко обозначенную форму. По всей площадке создается множество случайно расположенных фактических пятен контакта («ситочный» контакт). Из-за этого значительно снижается концентрация силовых линий тока и прочность уплотняющего пояса и в то же время возрастает склонность к выплеску, особенно для КМ ВКА-1 с высокой объемной долей волокон бора и малой толщиной плакирующего слоя; для материала, содержащего 55 % волокон бора, толщина плакирующего слоя должна быть не меньше 100—150 мкм. При меньших его толщинах нужно использовать промежуточные прокладки из алюминиевой фольги, дополнительная теплота от которой передается волокнам бора. Благодаря высокому электрическому сопротивлению и низкой теплопроводности волокна бора нагреваются больше алюминиевой матрицы и служат дополнительным нагревателем для плакирующего слоя в зонах контакта электрод—деталь. При нагреве механические свойства плакирующего слоя резко

падают, в то время как волокна бора сохраняют свое главное свойство — высокую жесткость.

В отличие от однородных металлов при протекании сварочного тока через КМ ВКА-1 происходит растекание силовых линий тока на большей площади из-за влияния сетки бора, что приводит к рассеянному тепловыделению. Поэтому нужно увеличивать контактную площадку электрод—деталь, используя электроды с радиусом сферы 150—200 мм, что обеспечит более равномерное распределение линий тока в сечении контакта и полностью ликвидирует внешние выплески. Для предотвращения внутренних выплесков сварку нужно вести на режимах средней жесткости, используя электроды с обжатием, особенно при толщине плакирующего слоя 50—150 мкм.

КМ системы алюминий—бор с 20 и 33 % волокон бора можно сваривать на параметрах режима, рекомендованных для алюминиевых сплавов типа Д16Т. При этом в ядре сварной точки трещины не образуются, приложение ковочного усилия не обязательно, оно необходимо лишь для снижения остаточных напряжений в металлоконструкции.

Выбор параметров режима точечной сварки следует производить с учетом объемной доли волокон бора в КМ (табл. 73).

Хотя основные характеристики КМ ВКА, влияющие на процесс тепловыделения и теплоотвода, практически такие же, как у сплавов типа 1420 и Д16Т, при их соединении литое ядро формируется в основном со стороны этих сплавов, а для обеспечения необходимого проплавления со стороны КМ нужно использовать специальные электроды и относительно жесткие импульсы сварочного тока.

Одним из недопустимых дефектов является образование выплеска, что обусловлено высокой жесткостью поверхностного слоя, его малой толщиной и несимметричностью контактной площадки деталь—деталь. Чтобы исключить эти дефекты, нужно использовать электроды с обжимной втулкой, уменьшать сварочное усилие на 20—40 %; при сварке КМ с толщиной плакирующего слоя более 200 мкм целесообразно применять электроды со стальной шайбой, имеющей внутренний диаметр 5—8 мм, которая обеспечивает требуемую плотность тока в контакте.

При толщине плакирующего слоя больше 200 мкм необходимо использовать мягкие режимы сварки и умеренные усилия сжатия (табл. 74, 75).

Прочность сварного соединения определяется только прочностью материала матрицы. При правильном выборе параметров режима и геометрии электродов можно обеспечить за счет нагрева и неравномерности усилий сжатия металла плакирующего слоя его интенсивное вдавливание в зазор соединения практически без образования зоны расплавления. При этом расстояние между волокнами бора соединяемых деталей составляет 20–80 мкм, соединение приобретает композиционные свойства и способно передавать значительную часть нагружения на расположенные рядом волокна бора. Эти свойства наиболее полно проявляются только в многоточечных соединениях или односточечных, выполненных в специальных устройствах, включающих изгиб.

В связи с меньшей усадкой КМ ВКА-1, чем алюминиевых сплавов, в точечных соединениях отсутствуют дефекты в виде пор и трещин. Прочность сварных соединений из этого КМ на срез в 1,2–1,5 раза, а на отрыв в 2–3 раза меньше, чем при тех же толщинах из сплава Д16Т; показатели усталостной прочности у этих материалов близки.

Диффузионная сварка в вакууме или инертной атмосфере КМ возможна как встык, так и внахлестку с образованием соединения в твердой фазе или полученных в процессе сварки-пайки. В последнем случае предусматривается сварка через прокладку-фольгу.

Дисперсионно-упрочненные системы алюминиевые сплавы + частицы SiC , Al_2O_3 , TiC свариваются через промежуточные прослойки из меди, серебра; сплавы системы Al-Li с теми же упрочнителями при использовании фольги из меди, цинка, серебра. Выбор состава прокладок основан на следующем принципе: они должны иметь температуру плавления эвтектики 550 °С (медь) и 560 °С (серебро) ниже температуры плавления алюминия или температура солидуса сплава (АД1) должна быть ниже, чем у сплава типа АД-31. Сварку нужно вести в области температур выше температуры эвтектики и солидуса при образовании жидкой фазы.

Как показывают результаты диффузионной сварки, выполненной при условиях, представленных в табл. 7.1, при использовании любой прокладки прочность соединения всегда больше, чем без нее. При использовании прокладки из сплава Д1 толщиной 75 мкм и меди разрушение происходит по основному металлу, а в других случаях — по поверхности раздела. Кроме того, при сварке с прокладкой степень деформации меньше 2 %. Еще лучше осуществлять сварку КМ АМг5+27%Al₂O₃ через нанослойную фольгу на основе системы Ni—Al состава 77 % Ni; 23 % (по массе) Al, которая наносится методом послойного электронно-лучевого осаждения металла на вращающуюся подложку; толщина слоя составляет 0,05–0,07 мкм. Сварку ведут на параметрах режима: $T = 520\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t = 5\text{ мин}$.

Таблица 7.1. Характеристика прокладок и ориентировочные параметры режима диффузионной сварки КМ АД31 + 15% Al₂O₃

Материал прокладки	Толщина прокладки, мкм	$T, ^{\circ}\text{C}$	$P, \text{МПа}$
Без прокладки	—	600	2
Сплав типа Д1	75	610 600	12
Сплав типа Д1	30	610 600	1 2
Серебро		600	2
Медь	5	610 600 550	1 2 1

В процессе сварки прослойка фрагментируется на отдельные дисперсионные частицы в результате твердофазной реакции в условиях интенсивного пластического деформирования материала. Прослойки с такой структурой активируют диффузионные процессы и не снижают существенно прочностные свойства сварного соединения, которые находятся на уровне 76 % показателя основного КМ.

Подобный КМ АМг5+27%Al₂O₃ сваривают с использованием промежуточной прослойки из быстро закристаллизованной ленты системы Al/Cu эвтектического состава Al+33%Cu

толщиной 0,07 мм. Сварку выполняют на параметрах режима: $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t = 10\text{ мин}$; $P = 40\text{ МПа}$. Общая пластическая деформация составляет 25 %. Благодаря использованию специальных формирующих устройств, действующих по схеме давление—сдвиг, можно получать качественные соединения при более низкой температуре и меньшем времени сварки. Промежуточный слой полностью исчезает после дальнейшей термической обработки.

При сварке дисперсионно-упрочненного КМ $\text{Al}+30\%\text{SiC}$, который изготавливается как методом порошковой металлургии, так и путем литья, применяется напыленное в вакууме промежуточное покрытие из никеля толщиной 2–5 мкм. Благодаря этому интенсифицируются процессы сварки, которая выполняется на параметрах: $T = 560\text{--}570\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 0,6\text{--}0,7\text{ МПа}$, $t = 15\text{ мин}$. Соединение разрушается по прослойке с вырывом основного материала.

Перед сваркой полезно осуществлять дегазацию деталей, что значительно улучшает качество сварного соединения.

Волокнистые дисперсионно-упрочненные КМ на никелевой основе с упрочнителями из нитевидных кристаллов, проволок из тугоплавких металлов, керамических или углеродных волокон свариваются с промежуточной прокладкой толщиной 0,1–0,3 мм состава: $\text{Co}+28\%\text{Cr}+25\%\text{W}+0,9\%\text{Ti}+0,4\%\text{Zn}+2\%\text{Re}+0,15\%\text{C}$. Равнопрочность при этом почти сохраняется, однако показатель при 100-часовой прочности при $T = 1090\text{ }^{\circ}\text{C}$ не превышает 15 % прочности основного материала. Этот способ сварки пригоден для соединения таких разнородных материалов, как титановый сплав + КМ КАС-1А, на параметрах режима: $T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 100\text{ МПа}$, $t = 10\text{ мин}$ с дальнейшей выдержкой при температуре сварки, но без давления на протяжении 30 мин без образования интерметаллидных фаз на границах титан—алюминий и сталь—алюминий и сохранении начального расположения армирующих стальных проволок.

При сварке титановых сплавов с КМ боралюминий можно объединять две операции — формирование детали и сварку монослоев полуфабриката КМ на режиме, необходимом для формирования боралюминия.

При диффузионной сварке в атмосферных условиях для предупреждения окисления титановой поверхности в зоне

сварки лучше всего алитировать ее 10 с в расплаве алюминиевого сплава АЛ (АД33) при $T = 680^\circ\text{C}$ и давлении 10 МПа. В результате создается защитный слой толщиной 0,1–0,3 мм, обеспечивающий получение прочного соединения: разрушение происходит по границе раздела плакирующего слоя и боралюминия.

Наиболее эффективным типом соединения КМ с титаном является сварка в замок типа «ласточкиного хвоста», которое обеспечивает передачу нагрузки на боралюминий за счет сдвига в условиях сжатия (рис. 7.6):

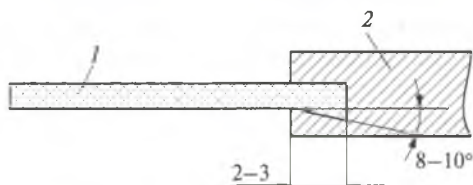


Рис. 7.6. Схема соединения КМ (1) с монометаллом (2) типа «ласточкин хвост»

Соединение внахлестку не обеспечивает полноценной передачи нагрузки на слои КМ, усложняет для слоистых КМ создание равномерного распределения давления, а высокая жесткость и хрупкость борных волокон способствуют образованию дефектов на границе раздела титан–алюминий.

Клинопрессовая сварка изделий из КМ боралюминий с законцовками из обычных конструкционных сталей выполняется в специальном приспособлении (рис. 7.7). Оправка 1 приспособления изготовлена из титанового сплава ВТ6, а обойма 2 — из молибденового сплава. На внутренней поверхности алюминиевой законцовки предварительно наносится резьба глубиной 0,3 мм с шагом 0,5 мм. Законцовка 4 сжимается с обоймой 2 устройства по скользящей посадке. Между резьбовой поверхностью законцовки и конусом 3 есть сборочный зазор 0,1 мм. Оправка 1 с конусом 3 собирается по скользящей посадке.

Давление запрессовки получается за счет термических напряжений, возникающих при нагревании двух коаксиально собранных жестких цилиндров с разными коэффициентами термического расширения $K_{тр}$. Собранные детали вместе с устройством нагреваются в защитной среде до температуры $(0,7–0,9)T_{пл}$ более легкоплавкого из соединяемых металлов.

Оправка имеет больший $K_{тр}$, чем обойма, поэтому расстояние между рабочими поверхностями оправки и обоймы сократится, а выступы («клинья») резьбы впредусуются в плакирующие слои трубы. Молибденовая обойма устройства в процессе нагрева препятствует расширению алюминиевой законцовки и фактически осаживает ее по внешнему диаметру. Оправка из титанового сплава ВТ6 увеличивается в диаметре при нагреве и, надавливая на внутреннюю поверхность конуса, упруго деформируется. Ее назначением является увеличение стойкости стенки конуса при впредсовании плакирующего слоя выступов резьбы законцовки. Средний диаметр цилиндрического корпуса в месте законцовки не изменяется. При испытании на сдвиг разрушение происходит по плакирующему слою алюминия.

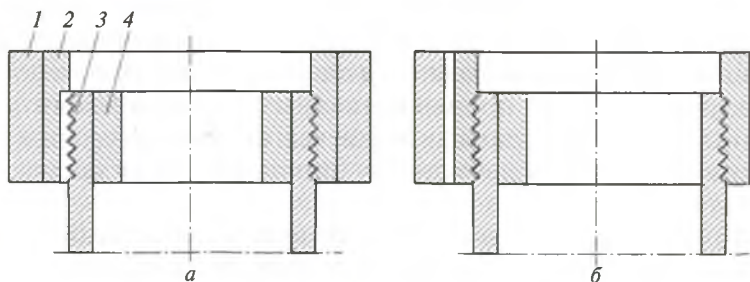


Рис. 7.7. Схема получения клинопрессовой сваркой соединения законцовки из алюминиевого сплава Д20 с КМ боралюминий с продольным и окружным армированием:

a — до сварки; *б* — после сварки

Сварка трением дисперсионно-упрочненных КМ сопровождается разрушением армирующих частиц, интенсивной пластической деформацией матрицы и возрастанием твердости, а в зоне термического влияния, наоборот, снижением твердости из-за отжига матричного сплава. Поэтому целесообразно производить старение таких алюмоматричных КМ, после чего прочность соединений достигает 80 % прочности основного материала.

ГЛАВА 8 РАЗНОРОДНЫЕ СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

8.1. Особенности разнородных сварных соединений

Часто оптимальные эксплуатационные свойства изделий можно получить лишь при использовании отдельных сварных узлов из разнородных цветных металлов. Так, путем сварки алюминия с медью можно существенно сократить расход дефицитной меди при изготовлении токоподводящих деталей электрических машин и аппаратов, шинопроводов; в электрохимической промышленности используются титано-медные катоды и титаноалюминиевые аноды электролизеров, а также трубчатые переходники, биметаллические кронштейны и т.п.

Использование подобных комбинированных сварных узлов вообще позволяет создавать принципиально новые виды конструкций, ранее отсутствовавшие.

Однако дополнительно к рассмотренным выше трудностям, возникающим при сварке цветных металлов, появляются новые, связанные с особенностью их взаимодействия при сварке. На стадии рассмотрения бинарных диаграмм состояния соединяемых металлов выясняется наличие ограниченного их взаимного растворения в жидком и твердом состояниях с образованием интерметаллидов, характеризующихся высокой твердостью и хрупкостью и разрушающихся самопроизвольно под действием температурных напряжений при охлаждении сварного шва. Эти интерметаллиды выделяются по границам сплавления в виде диффузионных прослоек разной толщины. При небольшой толщине 2—3 мкм прослойка существенно не влияет на прочность, при большей — резко ее уменьшает. Поэтому при сварке металлургическое воздействие должно быть направлено не только на уменьшение тол-

щины прослойки, но и на формирование не сплошного ее строения, а прерывистого.

Существуют и технологические трудности, обусловленные значительным различием характеристик соединяемых материалов, таких, как удельная масса, температура плавления, теплоемкость, теплопроводность, коэффициенты линейного расширения. Последнее обстоятельство особенно значимо, поскольку в таком случае невозможно снять сварочные напряжения путем термической обработки: нагрев после сварки еще больше их увеличит. Здесь поможет более высокий предварительный подогрев металла с меньшим коэффициентом линейного расширения или промежуточные металлы-компенсаторы, наплавленные либо напыленные на свариваемые кромки или в виде вставок. Последнее широко практикуется при сварке в твердой фазе — диффузионной в вакууме, трением и т.д. Лучшие результаты достигаются, если процесс вести при температуре не выше $0,4T_{пл}$ более легкоплавкого металла при достаточной активации поверхности более прочного металла.

При сварке плавлением целесообразно использовать технологию и технику, при которых тепловая мощность источника нагрева смещается в сторону более теплопроводного материала, а более тугоплавкий металл защищается от расплавления охлаждающим устройством.

Такие приемы лежат в основе способа соединения разнородных металлов — сварки-пайки, когда у одного из металлов значительно меньшая температура плавления. В таком соединении необходимые прочностные связи создаются в процессе смачивания жидким металлом поверхности твердого металла и дальнейшей диффузией. Надежность такого соединения обеспечивается при условии строгого соблюдения параметров режима и времени контактирования между жидким металлом и твердым. Нанесение на поверхность твердого тела покрытий из третьих металлов, которые не создают химических соединений со свариваемыми материалами, способствует торможению диффузионных процессов на границе их контакта или повышает взаимную растворимость элементов, что улучшает качество изделий.

При сварке разнородных металлов применяются те же типы соединений, что и для однородных, — стыковые, внахлестку и угловые, но для максимального уменьшения тепловложения угол

разделки кромок уменьшается, а предпочтение отдается стыковым швам. Свариваемые поверхности деталей подготавливаются в соответствии с рекомендациями для каждого из металлов.

Как условия эксплуатации, так и технология и техника сварки биметаллических разнородных переходников предусматривают пребывание сварного шва при температуре не выше 300–400 °С, иначе вследствие протекания диффузионных процессов возникает промежуточная прослойка из интерметаллидов, которая разупрочнит металлоконструкцию.

8.2. Технология и техника сварки пары металлов алюминий + медь

Эта пара металлов характеризуется ограниченной взаимной растворимостью: при комнатной температуре содержание меди в алюминии не превышает 6–8 %, а меди в алюминии — 9 %. Из-за перенасыщения излишнее количество элементов выделяется по границам сплавления в виде интерметаллидов типа Al_mCu_n и эвтектики $Al_2Cu + \chi$, имеющих низкую прочность и хрупкость. Кроме того, температура плавления меди в 1,6 раза, удельный вес в 3,3 раза выше соответствующих показателей для алюминия, а коэффициент линейного расширения почти в 1,5 раза ниже, чем у алюминия.

Сварка плавлением этих металлов ведется с применением третьих металлов, наносимых на медь гальваническим методом толщиной 50–60 мкм, — серебра, цинка, кремния, которые более или менее удовлетворительно растворяются как в меди, так и в алюминии, улучшая свойства сварного шва и зоны сплавления. Такое покрытие препятствует взаимодействию алюминия с медью: перед движущейся сварочной ванной образуется жидкая прослойка цинка, улучшающая смачивание поверхности меди алюминием. Процесс сварки надо вести так, чтобы в основном расплавлялся алюминий, а медь почти не плавилась, что достигается смещением оси электрода от оси сварного шва на 0,5–0,6 толщины свариваемого металла в сторону медной детали и может быть выполнено лишь при автоматической сварке. Разделке подвергаются только кромки медной детали.

Для аргонодуговой сварки — это V-образная односторонняя с углом раскрытия кромки 30° , для сварки по слою флюса — U-образная разделка, которая заполняется присадочными проволоками марки АД1. На поверхность свариваемых кромок медных деталей предварительно гальваническим способом наносится слой цинка толщиной 50–60 мкм. Лучший результат можно получить, применяя специальную алюминиевую проволоку, легированную кремнием и цинком. Сварка ведется на параметрах режима, данных в табл. 76.

Полученные сварные медно-алюминиевые соединения имеют прочностные характеристики на уровне алюминия.

Сварка в твердой фазе выполняется прокаткой для получения биметаллических листов, полос и плит. При холодной прокатке используются большие обжатия 60–75 %, что с учетом возможностей прокатного оборудования позволяет получить биметалл суммарной толщиной не более 4 мм, в котором медная составляющая равна 0,1–0,8 мм. При горячей прокатке в вакууме, вакуумированных пакетах, в атмосфере аргона можно получить биметалл большей толщины, где медь будет иметь рекристаллизованную структуру.

Холодная сварка меди с алюминием имеет несколько разновидностей. При *точечной сварке* для получения необходимой деформации используют пуансоны с различной площадью их рабочих частей, которые определяются из соотношения разных удельных давлений (для алюминия 280–590 МН/м², для меди 1960 МН/м²) в конечный момент сварки в однородном соотношении толщины и твердости металлов.

При сварке на режимах, которые учитывают перечисленные выше положения (табл. 77), можно получить качественные сварные соединения с высокими показателями свариваемости на уровне 17–20 %.

На основе тех же соображений можно сваривать алюминий с латунями марок ЛС59, ЛС62 при одностороннем вдавливаннии пуансонов со стороны меди или латуни, когда поверхность алюминия остается гладкой.

Другой разновидностью холодной сварки алюминия с медью является *облицовка* алюминия медью. Алюминиевые шины толщиной 3–10 мм облицовываются отожженными медными

штабами толщиной 0,3–1,2 мм в специальном устройстве одновременно несколькими точками (рис. 8.1). Многоточечное соединение более производительное, при нем не нарушается прочность соседних точек, однако для его реализации нужны прессы большой мощности. Лучшие результаты достигаются при использовании прямоугольных пуансонов, ширина которых близка к толщине меди и даже немного больше. Благодаря этому обеспечиваются лучшие условия течения металла и равномерного распределения удельного давления в контакте и, как следствие, более высокая прочность.

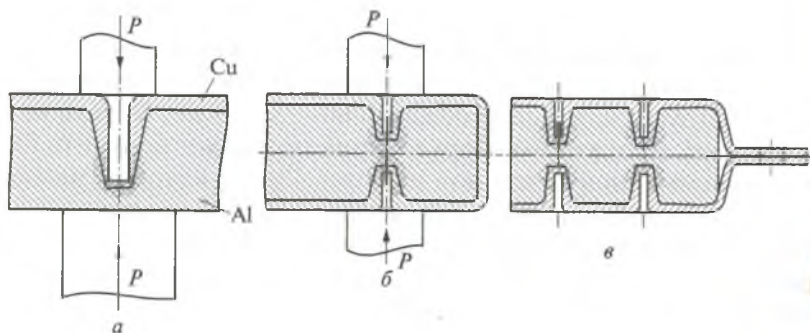


Рис. 8.1. Схема армирования алюминия медью:

а — одностороннее; *б* — двухстороннее; *в* — двухстороннее с креплением на меди

Высота пуансона при толщине алюминия до 3 мм выбирается такой, чтобы остаточная толщина в месте сварки составляла 17–20 % суммарной толщины алюминия и меди; при больших толщинах алюминия высота пуансонов равна 2,5–4,0 толщины медной облицовки. Равнопрочность таких соединений всегда обеспечивает надежную электрическую проводимость.

Стыковая холодная сварка предполагает отжиг меди хотя бы на участке вылета. Припуск на сварку для алюминия назначается больше, чем для меди. При сварке вначале деформируется алюминий, возникает сложная деформация с элементами сдвига алюминия по меди. Для обеспечения провара при сварке стержней устанавливаются такие припуски: $l_{Al} = (1,35–1,75)d_{Al}$, $l_{Cu} = (0,8–1,0)d_{Cu}$, а при сварке штабов: $l_{Al} = (1,5–2,0)\delta_{Al}$, $l_{Cu} = (1,0–1,25)\delta_{Cu}$, где d_{Al} , δ_{Al} — диаметр и толщина алюминия; d_{Cu} , δ_{Cu} — диаметр и толщина меди. При свар-

ке встык деталей разных диаметров и толщин, обычно у алюминиевых больших, чем у медных, вначале надо выполнить посадку меди, а потом отжечь припуск на сварку. Усилие осадки определяется соотношением

$$F_{\text{ос (Al + Cu)}} = (1,35 - 1,90) F_{\text{ос Al}}.$$

Параметры режима холодной стыковой сварки медно-алюминиевых деталей приведены в табл. 1.40. Свойства таких сварных соединений отличаются высокими статической, динамической прочностью и электрической проводимостью.

Сварка трением алюминия с медью позволяет получить соединения без микродеформирования более прочного металла благодаря резкой разнице сопротивления деформирования металлов при нагреве в стыке. Граница раздела представляет собой прерывистую интерметаллидную линию толщиной до 1,5 мкм. При приложении ковочного усилия прочность повышается. За счет интенсификации деформации и ее локализации в начале сварки можно ограничить рост прослойки вдоль поверхности контакта и сформировать дисперсную структуру без слоя интерметаллида. Так, при сварке стержней из металлов М1+АД1 диаметром 22 мм линейная скорость вращения составляет 1,5–2,0 м/с, скорость осевой деформации 5,5–8 мм/с, удельное давление при нагреве 40–70 МПа, при ковке 50–210 МПа, время торможения 0,2 с.

Процесс надо вести при минимальном времени нагрева и максимальном времени торможения, максимальном давлении при нагреве и проковке. За счет оптимизации времени торможения можно значительно уменьшить усилие проковки.

Диффузионная сварка в вакууме позволяет получить как непосредственное соединение меди с алюминием на оптимальных режимах, так и соединение с промежуточными вставками из цинка и серебра, если температурные и временные параметры режима сварки превышают оптимальные. В табл. 8.1 приведены максимальные значения температурных и временных показателей. При их превышении на границе образуются интерметаллидные соединения типа CuAl_2 и Cu_9Al_4 , что при толщине прослойки более 10 мкм уменьшает прочность соединения. Чтобы исключить этот дефект, при сварке используют проме-

жуточные металлические вставки из цинка и серебра, способные растворяться в алюминии вследствие протекания эвтектических реакций (Al–Zn) при $T = 382^\circ\text{C}$ и (Al–Ag) при $T = 566^\circ\text{C}$. При их использовании из зоны сварки хорошо удаляются оксидные пленки Al_2O_3 , однако при превышении температуры выше эвтектических прочность резко снижается, особенно при использовании цинка. Время сварки во всех случаях должно быть минимальным, чтобы не допускать роста толщины интерметаллидной прослойки более 10 мкм.

Таблица 8.1. Ориентировочные параметры режима диффузионной сварки в вакууме алюминия и его сплавов с медью

Свариваемые металлы	P , МПа	T , $^\circ\text{C}$	t , мин
Cu – AlO0	10	520	10
Cu – AMr6	7	540	25
Cu – AMц	7	510	15
Cu – Д16	5	600	15

Магнитно-импульсная сварка используется при изготовлении медно-алюминиевых трубчатых переходников. Сущность процесса заключается в реализации усилий, возникающих при взаимодействии магнитных полей тока индуктора и наведенного в свариваемых трубках.

Для этого используется энергия конденсаторной батареи емкостью 80 мкФ и максимальным напряжением 20 кВ, так что накопленная энергия составляет 16 кДж; она подается на индуктор, внутри которого находятся свариваемые трубки. Медная трубка диаметром 6 мм собирается внахлестку с алюминиевой диаметром 8 мм, и медная находится внутри развальцованной алюминиевой с небольшим зазором.

Для сохранения проходного сечения внутрь медной трубки вводится стальной стержень, впоследствии удаляемый. Собранные трубки вводятся в центральную часть машины-индуктора в зону наибольшей концентрации магнитных силовых линий. Под действием пондермоторных сил развальцованная часть алюминиевой трубки соударяется с медной, образуя прочное герметичное соединение.

Ударная сварка в вакууме применяется при изготовлении биметаллических шайб М1+АД1, собранных внахлестку, толщиной 2,4 мм и диаметром 30 мм. Детали, собранные с зазором 2—3 мм, предварительно подогревают кольцевым электронно-лучевым источником. При импульсном нагружении заготовки перемешаются в холодную деформирующую матрицу, где происходит сварка и одновременно формируется матрица, необходимой конфигурации. При этом деформации контакт алюминиевой деталей составляют соответственно 10 и 40 %, а прочное сварное соединение образуется без интерметаллидов.

8.3. Технология и техника сварки пары алюминий + титан

Согласно диаграмме состояния Al—Ti, при комнатной температуре их взаимная растворимость практически отсутствует, поэтому в алюминии может раствориться только 0,07 % титана, все остальное — интерметаллидные соединения $TiAl$, $TiAl_3$ и γ -фаза.

При сварке титана с алюминиевыми сплавами АМг и АМц появляются дополнительные трудности в связи с повышенной концентрацией на границе раздела фаз типа Al_mMg_n , Al_mCu_n и им подобных, так что невозможно избежать образования сварных швов с хрупкими фазами.

Сварка плавлением этих металлов предполагает ведение процесса способом сварки-пайки, когда жидкий алюминий взаимодействует с твердым титаном. Такая технология обеспечивает кратковременное контактирование двух металлов, когда концентрация титана недостаточна для создания γ -фазы, а количество соединений $TiAl_3$ существенно уменьшено. Необходимым условием является предварительное нанесение слоя алюминия на свариваемые титановые кромки, лучше всего алитированием, если размеры изделий невелики. В последнем случае процесс ведется погружением всего изделия или его части в расплав алюминия при $T = 800\text{--}830^\circ\text{C}$ и выдержкой 1—3 мин в расплаве в зависимости от размера детали и объема ванны и последующим охлаждением на воздухе.

Наплавка слоя алюминия выполняется под слоем флюса Ф-320, а процесс ведется на переменном токе вольфрамовым электродом в среде аргона на параметрах режима: $I_{\text{св}} = 170\text{--}180\text{ А}$, $U_{\text{д}} = 18\text{--}20\text{ В}$, $d_{\text{прис}} = 5\text{--}8\text{ мм}$, $Q_{\text{Ар}} = 16\text{--}18\text{ л/мин}$; толщина наплавленного слоя выбирается в зависимости от глубины проплавления при последующей сварке с алюминиевой деталью. Непроплавленная часть слоя должна быть не менее 2–3 мм.

При толщине титана более 3 мм соединение встык осуществляется при V- или X-образной разделке; угол скоса на титане должен быть равным 40–45°, а на алюминии 35°; притупление должно быть достаточным для удобного выполнения наплавки без проплавления титана. Основные типы сварных соединений – стыковое, внахлестку и тавровое (рис. 8.2).

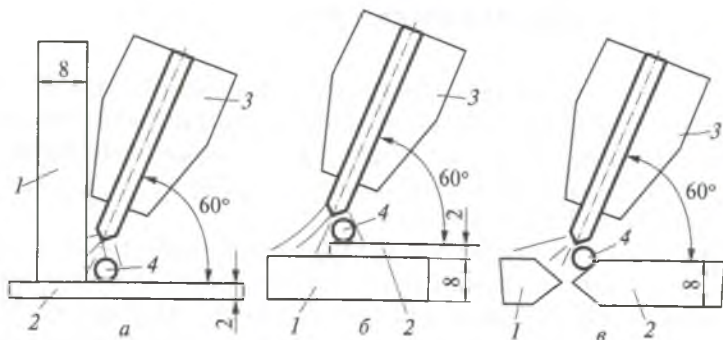


Рис. 8.2. Схемы процесса получения тавровых (а), нахлесточных (б) и стыковых (в) соединений титана с алюминием:

1 – алюминий; 2 – титан; 3 – горелка с неплавящимся электродом; 4 – присадочная алюминиевая проволока

Техника сварки предполагает размещение центра пятна сварочной дуги на уровне края титановой детали или со смещением его в сторону алюминиевой детали так, чтобы сварочная ванна образовалась без проплавления титановой детали с толщиной непроплавленного слоя алюминия 0,3–0,4 мм. При сварке внахлестку процесс ведется с созданием двух отдельных сварочных ванн (рис. 8.3).

Под действием излишней теплоты жидкой титановой ванны плавится алюминиевая деталь, в результате чего создается ванна жидкого алюминия, но из-за наличия слоя твердого непроплавленного титана 0,3–0,4 мм обе ванны не контактируют

между собой. Благодаря повышенной химической активности титана при температуре выше 800°C в процессе сварки происходят восстановление поверхностных оксидных пленок и диффузия кислорода в титан, вследствие чего возрастают его твердость и прочность.

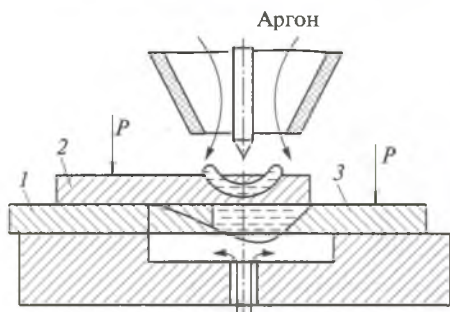


Рис. 8.3. Схема аргонодуговой сварки титана с алюминием с образованием двух отдельных сварочных ванн:

1 — прокладка-холодильник;
2 — титановая деталь; 3 — алюминиевая деталь

Защита плавильного пространства и прилегающих зон металла осуществляется за счет поддува инертного газа в подкладку, специальное «плавающее» сопло и в козырек (рис. 8.4). При сварке труб аргон подается в их внутреннюю полость. Обязательным условием качественного процесса является плотное прилегание свариваемых деталей.

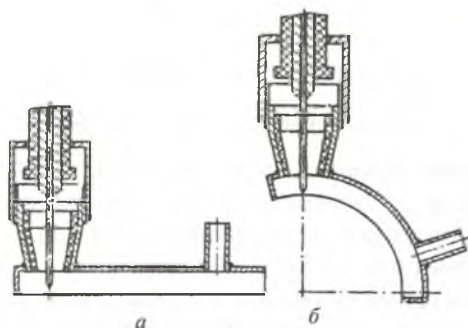


Рис. 8.4. Конструкция «плавающего» сопла с козырьком для сварки продольных (а) и кольцевых (б) швов титано-алюминиевых соединений

Зачистка поверхности алюминиевой ванны обеспечивает ее лучшее растекание по поверхности титана и способствует созданию качественного сварного соединения. При этом температура нагрева титановой поверхности должна быть достаточной для смачивания титана жидким алюминием, но не больше, чем максимально допустимая (примерно 1100°C).

При сварке «на весу» для уменьшения проплавления алюминиевой кромки путем отведения излишней теплоты применяют специальные холодильники в виде стальных или медных подкладок или колец (рис. 8.5). Их размеры в каждом случае определяются экспериментально в зависимости от теплопроводящих свойств материалов и параметров режима сварки.

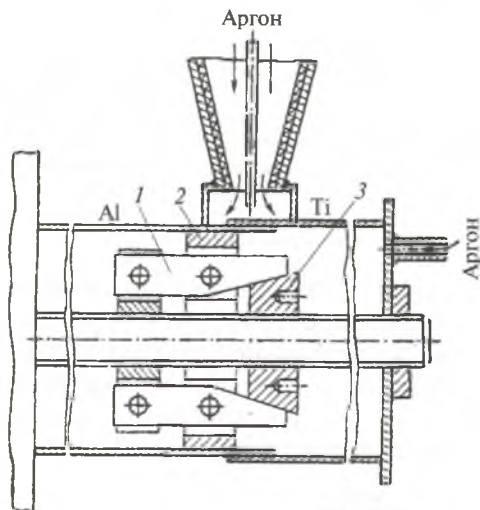


Рис. 8.5. Схема телескопического сварного соединения алюминиевой трубки с титановой:

1 — рычаг; 2 — стальное разжимное охлаждающее кольцо; 3 — нажимная гайка

Так изготавливаются сварные биметаллические аноды электролизеров, в которых листы из алюминия АД1 толщиной 8 мм соединяются с листами из титана ВТ1—0 толщиной 2 мм на параметрах режима, приведенных в табл. 8.2.

В качестве присадки используется алюминиевая проволока СВАК5 диаметром 3 мм. Сварочная дуга перемещается преимущественно по поверхности алюминия при смещении электрода от оси стыка в пределах 0—4 мм в зависимости от толщины титанового листа. При точном соблюдении параметров режима и техники сварки обеспечиваются допустимые температурно-временные условия взаимодействия алюминия с титаном. Полностью устранить появление интерметаллидов невозмож-

но, но с точки зрения работоспособности таких разнородных конструкций их наличие в виде отдельных разрозненных включений допустимо. При этом фактическая площадь контакта увеличивается за счет растекания жидкого алюминия по поверхности нагретого титана.

Таблица 8.2. Ориентировочные параметры режима аргонодуговой сварки алюминия АД1 с титаном Вt1-0 вольфрамовым электродом

Вид соединения	Толщина металла, мм		$I_{св}$, А	$V_{св}$, м/ч	Q_{Ar} , л/мин	
	Al	Ti			в горелку	на поддув
Тавровое	8	2	270–290	18–20	10	12
Внахлестку	8	2	190–200	10–12	10	15
Стыковое	8–10	8–10	240–285	18–20	10	8

Сварку тонколистовых титаноалюминиевых конструкций рекомендуется вести на параметрах режима, данных в табл. 8.3.

Таблица 8.3. Ориентировочные параметры режима автоматической аргонодуговой сварки тонколистовых соединений алюминия с титаном на скорости 18 м/ч

Толщина свариваемых деталей, мм		$I_{св}$, А	U_d , В	Размеры шва, мм	
Сплав титана	Сплав алюминия			Ширина	Глубина проплавления
1	1	70–80	8	2,5	0,25
1	1,5	95–100	8	4,8	0,25
2	2	120–140	9,5–10	7,2	0,35
2	3	160–170	10	7,8	0,15

Примечания. 1. Диаметр вольфрамового электрода 2 мм. 2. Расход газа в горелку и козырек 6 л/мин, на поддув 2 л/мин.

Сварка встык листовых титаноалюминиевых конструкций может выполняться с предварительным алитированием разделанных кромок титанового листа; кромки алюминиевого листа остаются необработанными. Сварка ведется на переменном токе на параметрах режима, данных в табл. 8.4.

Таблица 8.4. Ориентировочные параметры режима аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом диаметром 3 мм титана с алюминием

Свариваемые материалы	Толщина металла, мм	Присадочный металл		$I_{св}, A$	U_d, B
		Тип	$d, мм$		
BT1-0 + АД1	2	АД1	2,5	90–100	12–14
	3	АД1	2,5	115–125	14–16
BOT4 + АМг6	2	АД1	2,5	90–100	12–14
	2	АМг6	2,0	90–100	12–14
BT5-1 + АМг6	6*	АМг6	2,0	220–250	18–22

*Диаметр вольфрамового электрода 5 мм.

Сварочная дуга смещается на кромку алюминия на расстояние, равное толщине свариваемых пластин. При этом достигаются полное проплавление алюминия и хорошее смачивание кромки алитированного титана с благоприятным формированием обратной стороны шва на специальной подкладке.

Представленная технология чаще всего используется при изготовлении титаноалюминиевых трубчатых переходников. Лучшей работоспособностью отличаются стыковые сварные соединения при сварке труб из алюминия АД1 и титана BT1-0 диаметром 45 мм и толщиной стенки 1,5 мм. Кромки под сварку подготавливаются согласно рис. 8.6, а.

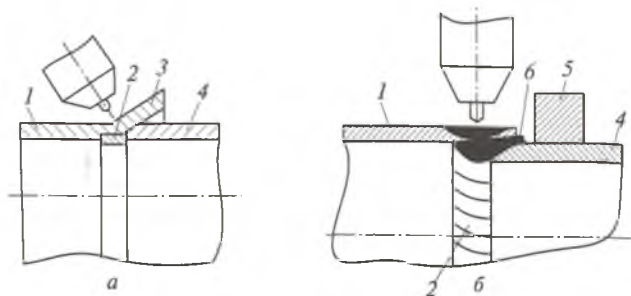


Рис. 8.6. Схема подготовки к сварке титаноалюминиевого трубчатого переходника, собранного встык (а), и образования сварного шва на деталях, собранных внахлестку (б):

1 – титановая труба; 2 – цилиндрическое присадочное кольцо; 3 – технологический буртик; 4 – алюминиевая труба; 5 – медный холодильник; 6 – галтель

Технологический буртик на титановой трубе выполняется с целью увеличения теплоемкости кромки и обеспечения достаточного количества теплоты для расплавления алюминия и после сварки он удаляется. Его оптимальная длина составляет 4–5 толщин трубы, а угол развальцовки титановой трубы и скоса алюминиевой кромки — 20° . Присадочное кольцо изготавливается из алюминиевого сплава, легированного 3,5–5 % Si, для предотвращения горячих трещин и формирования алюминиевой сварочной ванны без мениска в процессе смачивания титанового буртика. Положение сварочной горелки показано на рис. 8.6, а. Медный холодильник накладывается на алюминиевую трубу на расстоянии 1–1,5 мм от технологического буртика (на рис. 8.6, а он не показан) для обеспечения стабильности формирования сварного шва. Размеры холодильника 5 (рис. 8.6, б), выполненного в виде медного кольца с внутренним диаметром 45 мм, внешним 60 мм и шириной 10 мм, обеспечивают необходимое формирование сварного шва на алюминии на параметрах режима: в непрерывном процессе $I_{\text{св}} = 90\text{--}120\text{ А}$, $V_{\text{св}} = 15\text{ м/ч}$, в импульсном $I_{\text{св}} = 120\text{ А}$, $I_{\text{паузы}} = 25\text{ А}$, $V_{\text{св}} = 10\text{ м/ч}$, $t_{\text{имп}} = t_{\text{пауз}} = 0,5\text{ с}$. Для надежного прижатия соединяемых поверхностей свариваемых деталей применяется удельное осевое усилие 10–20 МПа.

Сборка труб внахлестку требует меньших трудозатрат, а для компенсации возможной неплотности при сборке на титановой трубе выполняется скос внутренней кромки для лучшей циркуляции поддуваемого аргона. Это вызывает вынужденное движение сварочной ванны в корне шва, вследствие чего в щель скоса вытесняется жидкий алюминий и создается валик типа галтели (рис. 8.6, б). Наличие валика свидетельствует о качественной зачистке поверхности алюминия от оксидов во время сварки.

Перечисленные приемы в сочетании с оптимальными параметрами режима позволяют получить качественные сварные разнородные соединения сплавов титана марок ОТ4, ВТ6С, ВТ20 и др. с алюминием и его сплавами марок АД0, АД1, АМц.

Сварка встык биметалла АД1 ВТ1–0 толщиной 1,5 + 1,0 мм соответственно, полученного совместной горячей прокаткой, выполняется в два этапа по схеме на рис. 8.7. Сначала к титановому слою биметалла точечной конденсаторной сваркой при-

варивается титановая накладка такой же толщины с шагом точек 7 мм. Потом на переменном токе сваривается алюминиевый слой биметалла на параметрах режима $d_{wз} = 2$ мм, $d_{прис} = 2$ мм, $I_{св} = 40-50$ А, $Q_{Лг} = 4-5$ л/мин.

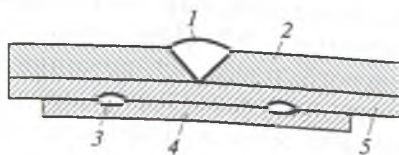


Рис. 8.7. Схема стыкового соединения биметалла алюминий – титан:
1 – шов; 2 – алюминий; 3 – титан; 4 – накладка; 5 – сварная точка

Другой разновидностью сварки-пайки является ведение процесса в камере с контролируемой инертной атмосферой аргона, когда нагрев соединяемых кромок (чаще всего деталей с поперечным сечением компактной формы) осуществляется электрической дугой переменного тока, горящей в зазоре между деталями. Она равномерно разогревает торцевые поверхности, осуществляет их катодную очистку и формирует слой расплавленного алюминия. После этого осуществляется осадка, при которой жидкий металл вытесняется из стыка, и сварное соединение формируется в твердожидкой фазе.

Сварка пары ВТ6С (14×2)+АМг3 (16×4) ведется на таких параметрах режима: вылет детали из зажимного устройства ВТ6С – 10 мм, АМг3 – 8 мм; величина зазора между торцами – 3,5 мм, $I_{имп} = 650$ А, $t_{имп} = 0,2$ с, $n_{имп} = 14$, $t_{нагр} = 1-3$ с, $t_{опл} = 0,1-0,3$ с, $F_{ос} = 1,5$ кН, $t_{ос} = 5$ с. Импульсный нагрев улучшает условия равномерного тепловложения и стабилизирует формирование жидкого слоя металлов на протяжении 1,5–2 с. Таким образом сваривают титаноалюминиевые трубчатые переходники с D_y от 4 до 40 мм, приваривается концевая арматура, а также стержневые заготовки диаметром 3–20 мм. При этом способе сварки отсутствуют непровары, небольшое количество вытесненного графа практически не уменьшает проходное сечение трубы, а прочность сварного соединения составляет 95 % прочности алюминия.

Электрическая контактная точечная сварка с управляемым внутренним выплеском также позволяет получить соединение

в твердожидком состоянии. Для предупреждения начального внутреннего выплеска передний фронт сварочного импульса модулируется, а после реализации внутреннего выплеска, во время которого удаляется жидкая часть ядра вместе с интерметаллидными соединениями, детали дополнительно проковывают с повышенным усилием для окончательного вытеснения жидкого металла и механического дробления интерметаллидной прослойки толщиной 2–4 мкм, что делает ее дискретной (табл. 8.5).

Таблица 8.5. Ориентировочные параметры режима точечной сварки разнородных металлов с управляемым внутренним выплеском

Свариваемые материалы	Толщина металла, мм	Диаметр точки, мм	$I_{св}$, кА	t_c , с	$F_{св}$, даН	$F_{ков}$, даН
Титан ОТ4–1 + латунь Л63 (с медно-никелевым покрытием)	0,85 + 0,35	3,5	8,5	0,02	3,5	7,2
Алюминий АД1 + титан ОТ4–1	1,0 + 0,85	4,5	12	0,02	2,1	4,0

Сварка в твердой фазе титана с алюминием выполняется несколькими способами.

Изготовление биметалла такого состава осуществляется прокаткой в вакууме с обжатием 68–70 % при температуре 470–500 °С. Получение состава биметалла ВТ1–0+АМг6 высокого и стабильного качества обеспечивается в том случае, если контактирующие поверхности предварительно нанесены тонкие слои алюминия; при этом обжатие может быть снижено до 47–50 %.

Холодная сварка такой же композиции производится при изготовлении трубчатых переходников путем совместного формирования заготовок в специальной оправке (рис. 8.8). Алюминиевая заготовка совмещается с титановой, на поверхности которой выполняются цилиндрические канавки и выступы треугольной формы с углом 60° и глубиной 1 мм. Зажимное кольцо имеет коническую форму, и по его торцу прикладывается удельное осевое усилие 280–320 МПа, которое обжимает со средним обжатием 37–43 % алюминиевую заго-

товку при перемещении кольца в заданное положение со скоростью 60–100 мм/мин. При этом алюминий заполняет канавки, создавая плотный контакт между соединяемыми металлами, так что прочность разнородного соединения равна прочности алюминия. Таким образом можно изготавливать работоспособные титаноалюминиевые переходники диаметром 10–100 мм.

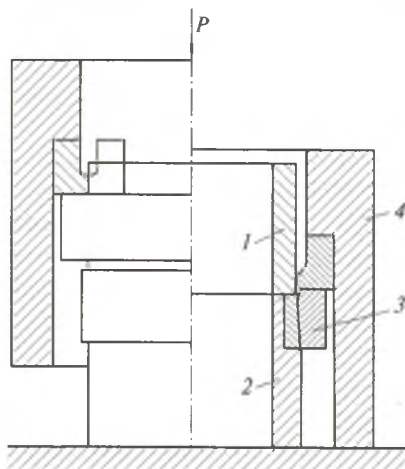


Рис. 8.8. Схема изготовления титаноалюминиевого переходника холодной сваркой:

1 – алюминиевая заготовка; 2 – титановая заготовка; 3 – стальное кольцо; 4 – обжимное кольцо

Диффузионная сварка титана ВТ1–0 со сплавом АД1 осуществляется при их непосредственном контактировании без образования интерметаллидной прослойки, а при сварке пары ВТ1–0+АМг3 необходимо алитирование титановой детали или размещение промежуточной прослойки из фольги АД1 толщиной 0,4 мм.

Подготовка алюминиевой поверхности под сварку ведется путем травления 1–1,5 мин в растворе состава: 30 мл H_2SO_4 , 70 мл H_3PO_4 , 5 мл HNO_3 , 10 мл глицерина при $T = 80–85^\circ C$. После этого детали сохраняются в глицерине до установки их в камеру, где глицерин испаряется в процессе сварки.

Сварка ведется при давлении, большем предела текучести материалов, при температуре процесса $550^\circ C$ в течение 60 мин, а необходимые геометрические размеры изделия сохраняются благодаря специальной оснастке, обеспечивающей принудительное формирование металла в зоне контакта. Если исполь-

зовать промежуточную прокладку с покрытием из сплава Al—Si, сварку можно вести при температуре, немного большей, чем $T_{пл}$ алюминия, в течение 15 мин при $P = 2$ МПа. Сварные соединения, полученные на оптимальных параметрах режима (табл. 8.6), герметичны и имеют прочностные характеристики на уровне алюминиевого сплава.

Таблица 8.6. Ориентировочные параметры режима диффузионной сварки алюминиевых сплавов с титановыми

Свариваемые материалы	P , МПа	T , °C	t , мин
BT1—0+A5	12	560	10
BT1—0+AMc	14,7	600	10
BT1—0+A5—Mц	14,7	620	10
BT1—0+AMr	14,7	590	10
BT1—0+A5—Mг6	8	600	30
BT1—0+AD1	8	600	30
(BT1 (BT6) +1)+A5—AK4	5	540	5
(BT1 (BT6) +1)—A5—AL26	7	500	20

8.4. Технология и техника сварки пары титан + медь

Титан и медь различаются по своим свойствам, образуя систему с ограниченной взаимной растворимостью, которая при температуре 400 °C составляет только 0,4 % (по массе). Расплавление этих металлов сопровождается образованием эвтектик и интерметаллидных фаз Ti_2Cu , $TiCu$ и $TiCu_3$, которые ответственны за разрушение сварного соединения уже в процессе охлаждения. Поэтому соединение этих металлов как при плавлении, так и в твердой фазе с нагревом осуществляется в основном с использованием промежуточных прокладок из этих металлов, удовлетворительно сваривающихся и с титаном, и с медью.

Сварка давлением титана с медью выполняется по схеме сварки-паи, приведенной выше для получения разнородно-

го соединения титан + алюминий (рис. 8.6). Свариваемые детали собираются внахлестку, их кромки зачищаются и обезжириваются. Для предупреждения смещения кромок используются специальные прижимные механические приспособления. Особое внимание уделяется точности установки и поддержания постоянного расстояния оси вольфрамового электрода от торца медной детали по всей длине шва, которое в зависимости от толщины составляет 1,5–4,5 мм в сторону меди. Сварка ведется на постоянном токе прямой полярности при расходе аргона в горелку с козырьком 6 л/мин, на поддув в приспособлении — 2 л/мин; остальные параметры режима приведены в табл. 8.7.

Таблица 8.7. Ориентировочные параметры режима аргонодуговой сварки титановых сплавов с медью

Свариваемые металлы	Толщина металла, мм	Присадочная проволока		Смещение электрода в сторону меди, мм	$I_{св}$, А	U_d , В	$V_{св}$, м ³ /ч
		Марка	d , мм				
ОТ 4–1 + М1*	2,0 + 1,0	—	—	1,5	95–100	8,0–8,5	0,6
ОТ 4–1 + М1*	0,8 + 1,0	—	—	1,5	50–52	7,5–8,0	0,6
ВТ 15 + М 3р**	3,0+3,0	БрХ1	1,2	2,5	250	10	—
ВТ 15 + М 3р**	5,0+5,0	МСр10	2,0	4,5	400	12	—
Ti3Al37Nb + М 3р**	2,0+2,0	БрХ1	1,2	3,0	260	10	—
Ti3Al37Nb + М 3р**	5,0+5,0	МСр10	2,0	4,5	400	12	—

*Непосредственная сварка-пайка. ** На титановую кромку предварительно нанесен слой меди.

При сварке β -титановых сплавов ВТ15 и Ti3Al37Nb с медью МЗр предварительно титановую кромку на деталях толщиной 3 и 5 мм разделяют с одной стороны под углом 45°, после чего на все титановые кромки методом плазменного напыления наносят слой меди толщиной 0,15–0,25 мм, а свариваемые детали собирают встык. Сварка ведется вольфрамовым электродом диаметром 3–4 мм на постоянном токе прямой полярности, ось которого смещается в сторону медной детали на 2,5–4,5 мм

с использованием медной присадки типа БрХ1 или МСр10 (табл. 8.7).

Технология сварки титана с хромовой бронзой марки БрХ1 с использованием промежуточной вставки из тугоплавких металлов — ванадия, ниобия, тантала реализуется в два приема: вначале сваривают титановый сплав с тугоплавким металлом, а потом с этим металлом сваривают хромовую бронзу. Параметры режима сварки этих композиций приведены в табл. 8.8. Прочность такого соединения находится на уровне медного сплава, а разрушение происходит по его границе со швом.

Таблица 8.8. Ориентировочные параметры режима электронно-лучевой ($U_{\text{уск}} = 60$ кВ, $I_{\text{св}}$ — в А) и аргонодуговой ($d_{\text{W3}} = 2$ мм, $Q_{\text{Ar}} = 10\text{--}12$ л/мин, $I_{\text{св}}$ — в А) сварки титанового сплава ОТ4 с хромовой бронзой БрХ1 через промежуточные вставки из тугоплавких металлов

Способ сварки	Свариваемые материалы	Толщина металла, мм	$I_{\text{св}}$, А	$V_{\text{св}}$, м/ч
Электронно-лучевой	ОТ4 + ВН2АЭ	1,0 + 1,0	15–18	30–35
	ОТ4 + V	1,0 + 1,0	12–14	30–35
	ОТ4 + Та	1,0 + 1,0	16–19	30–35
	ВН2АЭ + БрХ1	1,0 + 1,2	15–17	20–25
Аргонодуговой	БрХ1 + ВН2АЭ	1,2 + 1,0	180–200	30–40
	БрХ1 + Та	1,2 + 1,0	190–200	30–35
	ОТ4 + V	1,0 + 1,0	65–70	30–35
	ВН2АЭ + ОТ4	1,0 + 1,0	70–80	30–35

Электрическая контактная точечная сварка титана лучше реализуется с медными сплавами, например с латунью, если процесс ведется с управляемым выплеском (рис. 8.7), когда сварная точка с удовлетворительными прочностными характеристиками образуется в твердо-жидкой фазе с интерметаллидной прослойкой 2–3 мкм.

Сварка титана с медью в твердой фазе ведется по схеме, описанной выше для пары титан–алюминий. На соединяемых поверхностях меди выполняются выступы, а на титане — соответствующие им впадины. Свариваемые поверхности, находящиеся под углом к направлению действия сжимающего уси-

лия, взаимно контактируют, и при вдавливании образуется прочное и плотное сварное соединение.

Сварку трением ведут в среде аргона в специальной камере, которая закрывает свариваемые концы деталей по 40 мм с каждой стороны. Сварка ведется на параметрах режима: $n = 1500\text{--}3000$ об/мин, $V_{\text{под}} = 7\text{--}15$ мм/с, $t_{\text{св}} = 0,2\text{--}0,5$ с, $t_{\text{осад}} = 2,5\text{--}2,8$ с, $P_{\text{осад}} = 80$ МПа, вылет деталей 3–4 мм, мощность процесса 13 кВт.

Несмотря на частичное удаление интерметаллидов вместе с пластичным металлом, зона соединения характеризуется разрозненной прослойкой толщиной около 7 мкм, но разрушение соединения происходит по медной составляющей на расстоянии от сварного шва.

Вообще непосредственное соединение этих двух металлов невозможно без образования интерметаллидной прослойки. Даже такой быстрореализуемый способ, как сварка взрывом, требует использования промежуточного металла — ниобия толщиной 0,3–1,0 мм при толщине титана 5–15 мм и меди 3–8 мм при получении заготовки биметалла титан–медь для дальнейшей металлообработки прокаткой, где обязательной операцией является нагрев до $T = 750\text{--}800$ °С со скоростью 0,75–0,80 °С/с. После этого выполняется принудительное подстуживание пакета, так чтобы перепад температур между медью и титаном составлял 70–120 °С для последующей прокатки с обжатием 30–40 % за один проход.

Диффузионная сварка титана с медью может быть осуществлена только в узком температурно-временном диапазоне, что иногда трудновыполнимо на практике. Поэтому в качестве промежуточных материалов используют молибден и ниобий в виде как фольг, так и напыленных слоев.

Металл прослойки	Без прослойки	Молибден (напыленный)	Ниобий (на- пыленный)	Ниобиевая фольга 0,1 мм
$T_{\text{св}}, ^\circ\text{C}$	$\frac{80^\circ}{80^\circ}$	$\frac{95^\circ}{98^\circ}$	$\frac{95^\circ}{98^\circ}$	$\frac{95^\circ}{98^\circ}$

Здесь в числителе приведены данные, отвечающие условиям индукционного нагрева, времени сварки 30 мин и давлению 5 МПа, в знаменателе — данные для условий печного нагрева в течение

30 мин и давления 3,5 МПа. Лучшие результаты достигаются в последнем случае для всех композиций материалов.

Техника диффузионной сварки оказывает существенное влияние на поведение металла в приконтактных зонах под действием термомеханического цикла. Если сварка осуществляется в плотной оправке с кольцевой проточкой в месте стыка, происходит локальная деформация, в приконтактном слое меди протекает динамическая рекристаллизация под нагрузкой, металл остается пластичным, сохраняет свои свойства, а разрушение происходит по поверхности контакта.

Если сварка ведется в плотной жесткой оправке, которая обеспечивает совместную деформацию металлов независимо от их свойств, требуется значительно больше времени, чтобы титан продавил медь, деформация рассредоточивается, захватывая не только приконтактный слой, но и последующие участки. Динамическая рекристаллизация обеспечивает полное развитие физического контакта, релаксируя напряжения, залечивает дефекты кристаллической решетки и устраняет поры.

8.5. Технология и техника сварки пары алюминиевый сплав + магниевый сплав

Непосредственная сварка алюминиевых сплавов с магниевыми не позволяет получить полноценного сварного соединения даже в твердой фазе.

При *сварке взрывом* для получения биметалла МА2–1+АМг6 используется промежуточная прокладка из алюминия марки АД1. Для повышения работоспособности такой магний-алюминиевой комбинации между слоями АМг6 и МА2–1 рекомендуют вводить биметаллическую прослойку ВТ1–0+АД1. Так как коэффициент линейного расширения титана меньше, чем у свариваемых компонентов, после отпуска при $T = 300^\circ\text{C}$ этот фактор способствует благоприятному распределению остаточных напряжений при сохранении прочности соединения на уровне алюминия АД1. Чтобы повысить пластичность и устранить структурную неоднородность, заготовки из магниевого сплава перед сваркой и после каждой предыдущей операции

подвергают отжигу при $T = 450^\circ\text{C}$ для снятия упрочнения после сварки взрывом. Таким образом получают многослойный полуфабрикат для дальнейшей металлообработки прокаткой: АМг6 — 10 мм, АД1 — 3 мм, ВТ1-0 — 2 мм, МА2-1 — 5, 10, 20 мм. Дальнейшая сварка встык подобного многослойного соединения (рис. 8.9) выполняется на параметрах режима, приведенных в табл. 8.9 в такой последовательности: 1) сваривают на постоянном токе прямой полярности титановые составляющие без присадки «на весу», чтобы предотвратить оплавление внешних слоев; 2) сваривают на переменном токе алюминиевые составляющие с использованием присадки СвАМгб1 так, чтобы обеспечить натекание алюминия на активированную дугой поверхность титана; 3) сваривают магниевый сплав с использованием присадки ВМД-10. Образующаяся при этом интерметаллидная прослойка не снижает прочности вследствие ее малой толщины.

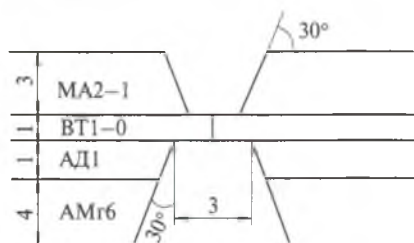


Рис. 8.9. Схема подготовки кромок для сварки многослойного материала

Таблица 8.9. Ориентировочные параметры режима сварки многослойного материала

Материал	d_{w3} , мм	$d_{прис}$, мм	$I_{св}$, А	U_d , В	$V_{св}$, м/ч	Число проходов
ВТ1-0	2	—	85	10	10	1
АМг6+АД1	5	3,5	280	18	7,3	1
	5	3,5	240—280	18	7—7,2	2
МА2-1	5	3,5	260	18	8,4	1

ГЛАВА 9 ТЕРМИЧЕСКАЯ РЕЗКА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

9.1. Особенности современных способов термической резки цветных металлов

При изготовлении металлоконструкций из цветных металлов возникает необходимость резки листового, профильного материала, прутков, труб и т.д. Если выполнение прямолинейных и некоторых криволинейных резов производится механически в холодном состоянии и не вызывает трудностей, то резка металла больших толщин, изготовление фасонных деталей, отверстий, поверхностной обработки всегда связаны с использованием термических способов резки, которые предусматривают обязательное расплавление или сгорание металла с образованием линии реза.

Как показывают данные табл. 9.1, не все материалы могут быть обработаны современными способами термической резки. Иногда возможности использования тех или иных способов ограничены толщиной металла, его составом, качеством реза и т.п. Класс точности вырезанных деталей и заготовок, допустимые нормы шероховатости поверхности и отклонения поверхности реза от перпендикулярности регламентируются ГОСТ 14792—80 и приведены в табл. ☁ 78 и ☁ 79.

В процессе термической резки возможно изменение структуры и газонасыщения металла в зоне, прилегающей к линии реза, вследствие чего необходима дополнительная механическая обработка для удаления металла, утратившего свои первоначальные свойства. Иногда глубина поврежденного слоя металла превышает допустимые значения шероховатости, указанные в табл. ☁ 79. Кроме того, при всех видах термической резки всегда образуется грат и происходит натекание расплавленного металла на нижней кромке, требующие удаления.

Таблица 9.1. Современные способы термической резки цветных металлов

Металл	Газоки-слород-ная	Кислород-но-флю-совая	Дуговая	Воздуш-но-дуго-вая	Плазмен-ная	Газола-зерная
Алюминий и его спла-вы	—	—	±	±	+	+
Медь и ее сплавы	—	±	+	±	+	—
Никель	+	±	±	±	+	+
Титан и его сплавы	+	±	±	±	+	+
Магни-евые спла-вы	—	—	±	±	+	—

Примечание: «+» резка целесообразна, «±» возможно, но нецелесообразно, «—» невозможно либо отсутствуют сведения.

Кислородная резка металлов возможна при следующих усло-виях:

- ♦ температура плавления металла выше температуры его сгора-ния;
- ♦ температура плавления оксидов ниже температуры плавления самого металла;
- ♦ расплавленные оксиды металла довольно жидкотекучи;
- ♦ теплопроводность металла невысокая и не препятствует кон-центрации теплоты, необходимой для нормального процесса резания;
- ♦ количество теплоты, которое выделяется при сгорании метал-ла в кислороде, достаточно для поддержания непрерывного процесса резания.

Всем перечисленным требованиям удовлетворяют только никель и титан, а также его сплавы. Никель по своим теплофи-зическим свойствам близок к низкоуглеродистой стали, поэто-му параметры режима резки никеля и резки стали близки. Про-цесс резки титана протекает весьма интенсивно и стабильно при чистоте кислорода от 98,2 % и выше, обеспечивая рез хоро-шего качества.

Для предотвращения оплавления и сгорания верхней кромки на ширину, превышающую в 2—3 раза ширину реза, нужно подводить резак к кромке с горящим подогревающим пламенем и включенной подачей режущего кислорода, а резку вести на параметрах режима, данных в табл. 9.2.

Таблица 9.2. Ориентировочные параметры режима механизированной ацетиленокислородной резки титановых сплавов при чистоте кислорода 99,2 %

Толщина металла, мм	Номер внутреннего мундштука	P_{O_2} , МПа	Расход, л/мин		$V_{рез}$, м/ч
			кислорода	ацетилена	
4	1	0,22	18—20	6—7	89
6	2	0,35—0,4	16—18	5—7	76
8	2	0,35—0,4	16—18	5—7	73
10	2	0,4—0,45	18—20	5—7	71
12	2	0,3—0,35	20—30	8—9	63
20	3	0,3—0,35	40—45	9—10	53
30	3	0,3—0,35	55—60	10—12	45
40	4	0,3—0,35	66—67	13—15	42
45	4	0,3—0,4	102—120	18—20	39
60	4	0,35—0,4	120—150	20—22	34

Примечания. 1. Расстояние от конца мундштука до металла 5—6 мм. 2. Давление ацетилена 0,02—0,05 МПа.

9.2. Технология и техника методов термической резки цветных металлов

Кислородно-флюсовая резка применяется для цветных металлов, не разрезаемых кислородной резкой вследствие невыполнения условий, указанных выше: их оксиды имеют высокую температуру плавления и высокую теплопроводность, которая препятствует концентрации необходимого количества теплоты в зоне резки.

Суть процесса заключается в том, что в зону реза вместе с режущим кислородом вводится специальный порошкообраз-

ный флюс (табл. 9.3), при сгорании которого выделяется дополнительная теплота, повышается температура, а продукты сгорания флюса, взаимодействуя с тугоплавкими оксидами, легко выделяются из зоны реза.

Таблица 9.3. Состав флюсов для кислородно-флюсовой резки меди и ее сплавов

Материал	Состав флюсов, % (по массе)			
	Железный порошок	Алюминиевый порошок	Доменный феррофосфор	Кварцевый песок
Медь	70–80	30–20	—	—
Латунь	70–80	10–5	—	20–15
Бронза	70–80	10–5	20–15	—

Подача флюса осуществляется к серийному резаку, укомплектованному флюсовой приставкой. Газофлюсовая смесь, выходя из отверстий приставки, засасывается через подогревающее пламя резака струей режущего кислорода в полость реза. Это позволяет разрезать металл толщиной до 250 мм. Техника кислородно-флюсовой резки такая же, как и для обычной кислородной резки, однако есть некоторые особенности. Так, кислородно-флюсовая резка меди требует предварительного разогрева подогревающим пламенем участка металла, с которого начинается резка, до $T = 800\text{--}900\text{ }^{\circ}\text{C}$, без чего процесс резки невозможен. При резке металла небольшой толщины можно применять общий предварительный подогрев, что существенно увеличивает скорость резки. При резке медных сплавов этот участок надо подогревать до $T = 400\text{--}500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Общая мощность пламени резака должна быть почти в 6 раз больше, чем при резке высоколегированных сталей.

Мощность подогревающего пламени для обеспечения равномерного нагрева частиц флюса до температуры сгорания выбирается больше на 15–20 %; увеличивается расстояние между торцом мундштука и поверхностью разрезанного металла. Чтобы уменьшить возможность загрязнения его выходных каналов, необходимо согласовывать скорость резки с количеством подаваемого флюса для стабильного ведения процесса. Соответствие выбора расхода флюса оценивается визуально по

наличию небольшого валика расплавленного железа на верхней кромке разрезаемого листа. Образовавшийся рез металла толщиной 5–25 мм имеет ширину 5–7 мм при ручном способе и 3,5–5,5 при механизированном, а при толщине металла 25–50 мм ширина реза составляет соответственно 7–9 мм и 5,5–7 мм.

Кислородно-флюсовая резка алюминия и его сплавов практически невозможна вследствие низкой температуры их плавления: подогревающее пламя резака вызывает оплавление широкой полосы металла и дает некачественный рез с большой шириной и оплавленными кромками. Поверхность реза на меди и медных сплавах плохая, поэтому необходима дальнейшая механическая обработка вырезанных деталей.

Этот способ может быть рекомендован только для таких работ, как раздельная резка металлолома, отрезание литников и т.п.

Дуговая и воздушно-дуговая резка применяется для разделительной резки, при этом можно использовать обычные электроды для сварки, повысив силу тока на 20–30 %, но лучше применять специальные электроды в соответствии с рекомендациями табл. 80 на переменном токе или постоянном токе обратной полярности.

Изделие нужно размещать так, чтобы жидкий металл мог свободно вытекать с линии реза. Резку можно выполнять и графитовыми электродами. Для этого используются электроды марок ВДК (круглые, длина 300 мм, диаметр 6, 8, 10, 12 мм) и ВДП (плоские, длина 350 мм, сечение 12×5 и 18×5 мм). Те и другие омедненные и пригодны для работы на токах до 580 А.

Лучшие результаты достигаются при использовании воздушно-дуговой резки, когда сжатый воздух подается в зону плавления и способствует выдуванию расплавленного металла с линии реза. Резка выполняется во всех пространственных положениях на постоянном токе обратной полярности или на переменном токе с характеристиками процесса, приведенными в табл. 81, а также с использованием специальных резаков в сочетании с обычными источниками питания.

Этот способ применяется не только для резки, но и для удаления дефектов литья и сварных швов, поверхностных повреж-

дений, например от кавитационной эрозии, разделки кромок под сварку и т.п. Недостатками воздушно-дуговой резки являются науглероживание поверхности резания и необходимость дальнейшей механической обработки кромок.

Плазменная резка цветных металлов и сплавов — наиболее распространенный и качественный способ этого вида металлообработки, когда металл в месте реза расплавляется и выдувается плазменной струей.

Благодаря высокой температуре и большой кинетической энергии плазменной струи можно резать все металлы (табл. 9.1). Качество реза при этом значительно выше, чем при воздушно-дуговом способе (табл. 9.4, 9.5).

Таблица 9.4. Ширина реза и припуски на механическую обработку после ручной плазменной резки

Толщина металла, мм	Латунь, бронза и сплавы алюминия	
	Ширина реза	Припуск
5—10	5—6	2
10—20	6—7	2
20—40	7—8	3
40—50	9—12	4
50—80	12—15	5

Таблица 9.5. Допустимая ширина зоны термического влияния при плазменной резке (ГОСТ 14792—80)

Класс	Нормы при толщине разрезаемых алюминиевых сплавов, мм		
	5—12	12—30	30—60
1	0,1	0,2	0,4
2	0,4	0,8	1,6
3	0,8	1,6	3,2

В зависимости от свойств разрезаемых металлов для создания плазменного потока применяются различные газовые среды (табл. 9.6, 9.7), но толщина разрезаемого металла ограничивается рабочим напряжением процесса (табл. 9.8).

Таблица 9.6. Характеристика рабочих сред для плазменно-дуговой резки

Среда	Разрезаемый металл	
	Алюминий и его сплавы	Медь и ее сплавы
Сжатый воздух	Механизированная резка металла толщиной до 70 мм	Механизированная резка металла толщиной до 60 мм
Азот: с воздухом с аргоном	Ручная резка металла всех толщин	
	Ручная и механизированная резка металла всех толщин	
	Резка металла всех толщин	
Аргон с водородом	Ручная и механизированная резка металла всех толщин	

Таблица 9.7. Выбор рабочей среды для плазменной резки алюминия и его сплавов

Газ		Показатель качества
плазмообразующий	защитный	
Воздух	Воздух	+
O ₂	Воздух	—
N ₂	CO ₂	++
N ₂	Воздух	+
N ₂	H ₂ O	++
Ar+35%N ₂	N ₂	++

Примечание. «+ +» — исключительно высокое качество реза, не требуется дополнительная механическая обработка кромок, отмечается высокая стойкость электрода; «+» — хорошее качество реза, высокая стойкость электрода; «—» не рекомендуется.

Таблица 9.8. Максимальная толщина разрезаемых металлов при ручной плазменной резке, мм

U _{раб} , В	Алюминиевые и магниевые сплавы	Медь	Латунь, бронза
70–80	40	15	30
90–110	80	50	70
120–140	100	80	90

Характеристика плазмообразующих и защитных газов приведена в табл. 4. Сжатый воздух с давлением 0,6–0,7 МПа

отбирается из заводской централизованной магистрали или от отдельного компрессора. При этом нужно обеспечить чистоту за счет установки масло- и влагоотделителей.

Поскольку *алюминий и его сплавы* склонны к образованию тугоплавких оксидов и растворению в них водорода, необходимо обеспечить условия для удаления окисленного металла из полосы реза, ее защиту от окисления, а размеры оплавленной кромки на участке реза должны быть минимальны. Температура плавления алюминия низкая, в связи с чем скорость его резки должна быть высокой и уступать по этому показателю только титану и магниевым сплавам. Алюминиевые сплавы толщиной 5–20 мм можно резать в азоте или на воздухе. Качество реза ухудшается при резке металла толщиной 60 мм и более. Металл толщиной 30–100 мм целесообразно резать в азотно-водородных смесях; для получения поверхности реза с минимальной шероховатостью применяют аргоноводородную смесь с 35–50 % H_2 .

В оплавленном слое алюминиево-магниевых сплавов происходит равномерное по толщине реза выгорание магния, сопровождаемое интенсивным выделением белого дыма. При резке этих сплавов необходимо очень точно соблюдать параметры процесса.

Алюминиево-марганцевые сплавы и дюралюмины разрезаются в смеси с меньшим содержанием водорода или в азоте.

Медь и медные сплавы благодаря высокой теплоемкости и теплопроводности требуют большей мощности при резке, чем стали. В качестве плазмообразующего газа применяют азотные смеси с высоким содержанием водорода и сжатый воздух, качество реза в обоих случаях одинаково. Резка меди небольших и средних толщин выполняется воздушно-плазменным способом на силе тока 350–400 А. Кромки реза требуют механической обработки на глубину 0,5–1,5 мм.

При резке *латуней* при тех же условиях скорость процесса может быть увеличена на 25–30 %. Кромки реза не нуждаются в обработке, но в ответственных случаях она необходима на глубину 0,5–1,0 мм.

Резка *титана и его сплавов* выполняется в азотно-воздушной смеси и в чистом азоте и рекомендуется только как предварительная операция, после которой нужна механическая обработка кромок, поскольку в металле, прилегающем к кромкам,

на глубине 0,1–0,2 мм увеличивается содержание газов по сравнению с основным металлом: кислорода — в 1,5 раза, азота — в 7–10 раз, водорода — в 4–8 раз. Поэтому оплавленный слой необходимо снимать на глубину 0,3–0,8 мм.

Тип и конструкция электродов плазмотрона зависит от состава плазмообразующего газа, а основной характеристикой материала электрода являются его эмиссионные свойства, влияющие на стабильность горения дуги и охлаждение электрода. Электроды, работающие в кислородосодержащих средах, изготавливаются из гафния. Для улучшения тепловыделения от активной катодной вставки из гафния ее размещают вровень в медной обойме диаметром не меньше определенного значения для заданного тока дуги. Это объясняется необходимостью надежного теплоотвода от активной части катодной вставки и повышения ресурса ее работы. Надежность теплового и электрического контакта вставки с обоймой достигается благодаря совместной холодной штамповке двух деталей.

Для предупреждения расплавления стенки медной обоймы между ней и вставкой размещается алюминиевая прокладка толщиной 0,05–0,15 мм. Ресурс работы такого электрода при силе тока 200–300 А и диаметре сопла 3 мм составляет 1,5–3 ч суммарного времени горения дуги.

В плазмотронах, предназначенных для использования инертных и нейтральных плазмообразующих сред, применяются вольфрамовые электроды (табл. 1.6). Конструктивно они выполняются в виде стержня, который фиксируется цанговым зажимом, закрепленным в электродном узле плазмотрона, или в виде медной державки с забитым в ней стержнем вольфрама; последняя схема позволяет получать большие плотности тока на катоде благодаря лучшим условиям теплоотвода и более экономична с точки зрения расхода вольфрама.

Вольфрамовый стержень затачивают для получения на его конце симметричного конуса с углом при вершине 20–30° и закрепляют в разрезной цанге по оси формирующего канала. Положение стержня по отношению к входному сечению сопла регулируется так, чтобы острие катода было расположено немного выше входного сечения сопла, а их размеры выбираются в зависимости от силы рабочего тока (табл. 9.9).

Таблица 9.9. Зависимость диаметра вольфрамового электрода и формирующего сопла от силы тока

I, А	Диаметр, мм		I, А	Диаметр, мм	
	катода	сопла		катода	сопла
150–200	1,8	1,9–2,0	400–500	3,5	3,8–4,0
200–250	2,0	2,2–2,5	500–600	4,0	4,5–5,0
250–300	2,5	2,8–3,0	600–700	4,5	5,0–5,5
350–400	3,0	3,2–3,5	700–800	5,0	5,5–6,0

Для обеспечения соосности стержня и формирующего сопла место посадки электрода шлифуется.

Сопло, являясь наряду с электродом основным элементом плазмотрона, осуществляет формирование геометрических и энергетических параметров дуги, а также выполняет роль вспомогательного электрода для обеспечения зажигания вспомогательной (дежурной) дуги. С ее помощью осуществляется переход к возбуждению основной дуги, горящей между катодом (анодом) плазмотрона и обрабатываемым изделием. Диаметр и высота канала сопла зависит от силы рабочего тока, состава и расхода плазмообразующего газа. Обычно высота канала равна его диаметру или немного больше.

Тщательная подготовка металла обеспечивает хорошее качество реза и высокую производительность процесса. При транспортировании нужно избегать деформации и повреждения поверхностей тонколистового металла из алюминия и некоторых медных сплавов и использовать специальные тележки или краны с пневматическими присосками, равномерно расположенными по поверхности металла. Перед резкой поверхность очищают от бумаги и консервирующей смазки. Обрабатываемый материал должен иметь надежный электрический контакт с заземляющим кабелем.

При ручной или полуавтоматической резке детали размечаются черчением и кернением контура с шагом между точками 10–20 мм. Меловая разметка не обеспечивает точного контура и легко стирается или сдувается с поверхности металла.

При разметке деталей надо учитывать припуски на резку в зависимости от назначения вырезанных деталей. Разметка при

механизированной резке заменяется программным контурным управлением.

При назначении параметров режима резания нужно учитывать особенности цветных металлов и сплавов: оценить реальные возможности и условия получения заданной точности резания, что определяется типом рабочего газа и мощностью дуги, которая должна быть максимальной для выбранного источника питания; выбрать оптимальное соотношение силы тока и напряжения, а также диаметр и длину канала сопла, расход рабочего газа и скорость резки. Эти данные приведены в табл. 9.10, 9.11, 82.

Таблица 9.10. Ориентировочные параметры режима ручной резки листового металла из алюминия и его сплавов аппаратами Плр-50/250 с воздушным охлаждением

Толщина металла, мм	Ширина реза, мм		Диаметр сопла, мм	$I_{рез}$, А	U_d , В	$Q_{газа}$, л/мин		$V_{рез}$, м/ч
	верхней части	нижней части				азота	воздуха	
10	4,2	3,0	2,5	165	80	65	65	60
16	4,5	3,3	2,5	200	90	65	65	50
24	4,7	3,8	2,5	200	100	65	65	40
40	8,5	6,0	3,0	250	115	65	65	20
50	9,5	6,5	3,0	280	125	65	65	18

Таблица 9.11. Ориентировочные параметры режима ручной резки прибылей алюминиевого литья аппаратами Плрм-80/400

Толщина металла, мм	Диаметр сопла, мм	$I_{рез}$, А	$Q_{газа}$, л/мин		$V_{рез}$, м/ч
			аргона	водорода	
15	3,5	280	37	23	45
20	3,5	300	37	23	40
30	4,0	320	33	22	33
40	4,5	360	33	22	33
50	4,5	380	28	20	30
60	5,0	400	28	20	27
70	5,0	420	28	20	24
100	5,0	420	27	18	20

Резку тонкого металла рекомендуется производить с помощью микроплазменного процесса по параметрам, приведенным в табл. 83, а механизированную резку металла средних и больших толщин выполнять на параметрах, данных в табл. 9.12, 9.13, 84.

Таблица 9.12. Ориентировочные параметры режима механизированной резки листового алюминия и его сплавов аппаратами ПЛМ-160/630 и ОПР-6

Толщина металла, мм	Ширина реза, мм		Диаметр сопла, мм	$I_{\text{рез}}, \text{А}$	$U_{\text{д}}, \text{В}$	$Q_{\text{газа}}, \text{л/мин}$		$V_{\text{рез}}, \text{м/ч}$
	верхней части	нижней части				аргона	водорода	
10	7,5	3,5	4	500	120	33	33	720
24	7,5	5,5	5	720	130			330
30	7,5	4,5	5	720	130			250
50	9,0	4,5	5	720	140			130
70	9,0	4,5	5	720	140			80
90	9,5	5,0	5	720	150			55
125	9,4	6,5	5	680	160			33
140	16,0	10,0	5,5	950	165			24

Таблица 9.13. Ориентировочные параметры режима плазменной резки меди и латуни

Металл	Толщина металла, мм	Диаметр сопла, мм	$I_{\text{рез}}, \text{А}$	$U_{\text{д}}, \text{В}$	$Q_{\text{газа}}, \text{л/мин}$				$V_{\text{рез}}, \text{м/ч}$
					аргона	азота	водорода	воздуха	
Медь	5	3	300	75	—	36	—	—	90
	15	4	300	92	—	32	—	—	40
	25		350	90	17	—	8	—	15
	40	7	700	120	6	—	66	168	40
	100			145	6	—	66	168	10
Латунь	6	3	260	70	—	70	—	—	100
	30	4	350	85	—	60	—	—	15
	90	5	500	140	—	34	17	—	12

Чтобы значительно повысить эффективность резания толстолистного металла, в резке реализуют вихревую подачу плазмобразующего газа вместо осевой проточной подачи (табл. 9.14).

Таблица 9.14. Ориентировочные параметры режима плазменной резки алюминиевых сплавов большой толщины (расход аргона 25 л/мин, водорода – 33 л/мин)

Толщина металла, мм	Ширина реза, мм		Диаметр сопла, мм	$I_{рез}$, А	U_d , В	$V_{рез}$, м/ч
	верхней части	нижней части				
24	4,5	3,0	3,0	280	130	90
50	6,2	5,0	4,2	450	135	60
70	6,5	5,0	4,5	450	150	45
90	8,5	5,5	5,2	700	155	33
120	9,5	7,5	5,5	700	160	22

Таблица 9.15. Ориентировочные параметры режима плазменной механизированной резки меди и ее сплавов, алюминия и его сплавов в среде воздуха с водой (расход воздуха на резку 80–90 л/мин, расход воды 0,3–0,35 л/мин)

Толщина металла, мм	$I_{рез}$, А	U_d , В	$V_{рез}$, м/ч (медь и ее сплавы)*	$V_{рез}$, м/ч (алюминий и его сплавы)**
4	270–290	140–145	425–450	300–360
6	270–290	140–145	180–210	240–300
8	270–290	140–145	100–180	210–240
10	270–290	140–145	130–150	180–210
12	270–290	140–145	110–130	170–180
14	270–290	150–155	97–110	150–160
16	270–290	155–160	85–97	140–150
18	270–290	160–165	70–85	120–130
20	290–310	165–170	60–72	110–120
24	290–310	170–175	45–60	85–100
30	290–310	180–185	36–42	60–70
				35–45

*Ширина реза по нижней кромке 2,5–3 мм. **Ширина реза по нижней кромке 3,5–4 мм.

Для улучшения условий труда, качества кромок, уменьшения тепловых деформаций вырезанных деталей и увеличения скорости резания плазменную резку выполняют с дополнительной подачей воды в зону резания (табл. 9.15,  85).

Резы, выполненные с использованием воды, характеризуются высоким качеством кромок, металл сохраняет натуральный цвет, легирующие элементы не выгорают. Недостатком выступает сложность возбуждения дуги в начале процесса, из-за чего процесс является недостаточно надежным.

При правильно выбранных параметрах режима поток искр, выбрасываемых из полости реза, перпендикулярен поверхности листового металла, а поверхности кромок почти параллельны.

Процесс резки листа можно начинать с кромки или середины листа. Начало резки определяется моментом возбуждения режущей дуги и складывается из врезания, т.е. начального проплавления по всей толщине металла, и переходного периода — от стадии врезания до стадии устойчивого резания. При возбуждении дуги плазматрон устанавливают над начальной кромкой разрезаемого листа или подводят его к кромке с горячим факелом дежурной дуги так, чтобы обеспечить возбуждение режущего разряда без образования двойной дуги и исключить возможность неполного прорезания начальной кромки. Для этого плазматрон устанавливают так, чтобы ось формирующего сопла располагалась на расстоянии 3–5 мм от кромки.

После возбуждения дуги не следует задерживать резак около кромки больше 2–5 с в зависимости от толщины металла. После проплавления металла по всей толщине плазматрон приводится в движение в заданном направлении.

Резку с внутренней поверхности листа начинают с образования начального отверстия. Предварительное сверление отверстий диаметром не менее 6 мм применяется только при ручной резке металла большой толщины: 40 мм для меди, 50 мм для алюминия. При резке переносными и стационарными машинами сверловка обязательна при толщине любого металла более 28 мм.

Пробивка металла плазменной дугой — наиболее сложная операция плазменной резки и состоит из следующих шагов:

1) возбуждается дежурная дуга, при этом плазмотрон поднимают над точкой пробивки отверстия на расстояние с зазором до 50 мм, чтобы не произошло возбуждения режущей дуги; 2) плазмотрон постепенно опускают до образования режущей дуги; 3) плазмотрон вновь приподнимают на 4–6 мм и перемещают в направлении контура реза или включают рабочий ход режущей машины; при этом поток выплавленного металла выбрасывается в сторону, противоположную направлению движения; 4) снижают плазмотрон до 3–10 мм над поверхностью изделия, из-за чего возможно повреждение наконечника. При ручной резке и резке с использованием переносных машин моменты поднятия и опускания резака определяются визуально, а при механизированной резке контролируются автоматически по времени, которое необходимо на пробивку отверстий определенной толщины — промежуток времени от начала возбуждения режущей дуги до начала движения резака по заданной траектории.

При недостаточной выдержке металл не пробивается на всю толщину и прорезается уже в процессе резки, в результате чего у нижней кромки образуется участок непрорезанного металла. При запаздывании движения резака (обычно это время составляет 2 с) диаметр пробитого отверстия превышает ширину реза, поэтому на кромке детали остается захват, ухудшающий внешний вид и усложняющий дальнейшую сварку. Пробивку рекомендуется выполнять со стороны от контура вырезаемой детали (на отходе).

Для уменьшения скоса кромки резку выполняют по часовой стрелке (деталь по отношению к линии разреза должна находиться с правой стороны). Отверстия нужно вырезать в первую очередь. Вырезку деталей нужно начинать от одной из кромок листа, последовательно переходя от одной детали к другой в направлении к противоположной кромке. При этом рекомендуется выполнять совмещенные резы. Узкие и длинные детали ($l \geq 6\delta$, где l — длина; δ — толщина) размещают вдоль продольной кромки листа, причем более длинные детали ближе к кромке, от которой начинается резка, а короткие — ближе к середине листа и к противоположной кромке. Вырезка начинается с узких и длинных деталей, расположенных возле кромки. Детали, имеющие одну

кромку с вырезами, нужно располагать этой кромкой в сторону кромки листа, от которой начинается вырезка деталей.

Начало и направление реза каждой детали должны быть такими, чтобы кромка, соединяющая деталь с основной массой листа, обрезалась в последнюю очередь. На стационарных машинах вырезку листовых деталей длиной больше 5 м, шириной больше 0,8 м начинают с угла, с длинной кромки. Нужно предусмотреть плавное увеличение выпуклости или уменьшение вогнутости обеих кромок на 0,5 мм. Если одна деталь занимает большую часть листа, то вырезку нужно начинать с нее. При вырезке полос толщиной до 12 мм необходимо оставлять перемычки длиной 15 мм через 1200 мм для ширины до 100 мм, через 1800 мм для ширины 100—200 мм, через 2700 мм для ширины 200—300 мм; они остаются на двух продольных кромках таким образом, чтобы находились на одной прямой, перпендикулярной длинным кромкам листа. При вырезке более толстых деталей перемычки не оставляют.

При газолазерной резке благодаря высокой концентрации энергии в лазерном луче возникают локальное плавление и испарение материала любого состава.

Основными параметрами режима являются мощность излучения и вид режущего газа, которые зависят от толщины металла и природы материала:

Мощность излучения, кВт	0,5	1,0	4,9
Предельная толщина, мм:			
сталей	3—5	5—7	8—18
алюминиевых сплавов	2	3—4	6—8

Резку целесообразно осуществлять, используя в качестве режущего газа кислород для удаления расплава и образовавшихся оксидов из полости реза. Реакция окисления металла экзотермическая, что способствует выделению дополнительного количества теплоты, необходимой для снижения вязкости образовавшихся оксидов и поддержания непрерывности процесса резания. Окисление струей кислорода нагретой поверхности металла способствует увеличению поглощения ею

лучевой энергии и повышению эффективности нагрева (чистые металлы поглощают 2–6 % тепловой энергии луча, а их оксиды – почти 100 %).

Расход кислорода составляет 4–9 л/мин, а его давление 0,25 МПа. Скорость резки зависит от природы материала, его толщины и мощности луча. Ширина реза определяется диаметром сфокусированного луча и почти на порядок ниже, чем при плазменной резке. Эти зависимости представлены в табл. 86 и 9.16.

Таблица 9.16. Ориентировочные параметры режима лазерной резки (лазер на CO_2) сплавов титана в среде кислорода

Мощность, кВт				
0,2			0,85*	
Толщина металла, мм	Ширина реза, мм	$V_{\text{св}}$, м/ч	Толщина металла, мм	$V_{\text{св}}$, м/ч
2	0,2	1080	5	200
10	1,5	170	5	200
40	3,5	30	5	200

* Диаметр фокусирующей линзы 0,3 мм.

На эффективность резки влияет отражающая способность поверхности обрабатываемого металла, поэтому медь и алюминий плохо поддаются лазерной резке аппаратурой, работающей на CO_2 . Тем не менее этот способ резки имеет большие перспективы благодаря высокой скорости резки, небольшому термическому воздействию, отсутствию тепловых деформаций, высокому качеству реза, отсутствию давления на обрабатываемую поверхность, что особенно важно при резке металла толщиной менее 0,1 мм, отсутствию шума и загрязнения окружающей среды.

ГЛАВА 10 ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СВАРКИ И РЕЗКИ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

10.1. Особенности оборудования для сварки и наплавки цветных металлов и сплавов

При сварке, наплавке и термической резке цветных металлов применяется в основном стандартное универсальное оборудование, пригодное для металлообработки широкой номенклатуры конструкционных металлических материалов. Однако в связи с некоторыми особенностями металлургических и технологических свойств этих материалов разработаны и эксплуатируются также модернизированные стандартные и специализированные аппараты и устройства, которые отвечают необходимым требованиям при изготовлении металлоконструкций из цветных металлов.

Газовая сварка производится с применением кислорода и ацетилена, которые поставляются в баллонах (табл. 10.1).

Таблица 10.1. Свойства газов для сварки и резки и условия их содержания

Газ	$P_{\text{газа}},$ МПа	Надпись на баллоне	Цвет краски			Вместимость баллона, л
			баллона	надписи на баллоне	полосы на баллоне	
Ацетилен	1,9	Ацетилен	Белая	Красная	—	5320
Азот	15	Азот	Черная	Желтая	Черная	5700
Аргон	15	Аргон	Серая	Зеленая	Зеленая	6200
Водород	15	Водород	Темно-зеленая	Красная	—	6000
Гелий	15	Гелий	Коричневая	Белая	—	6000
Кислород	15	Кислород	Голубая	Черная	—	6200
Воздух	15	Сжатый воздух	Черная	Белая	—	6000

Примечания. 1. Ацетилен находится в баллоне в растворенном виде, остальные — в сжатом.

2. К ацетиленовому баллону штуцер присоединяется с помощью хомута, к водородному — штуцером с резьбой $\varnothing 21,3$ мм, 14 ниток на 1" левой, к другим — штуцером с резьбой $\frac{3}{4}$ " трубной правой.

К баллону присоединяется редуктор для снижения давления газа до рабочего значения. Тип редуктора выбирается в соответствии с ГОСТ 13861—89 в зависимости от необходимых расходов газа (табл. 10.2).

Таблица 10.2. Технологические характеристики газовых редукторов

Тип	Рабочий газ	$P_{\text{газ}}$ на входе, МПа		$Q_{\text{газ}}$, м ³ /ч
		наибольшее	наименьшее	
БАО-5	Ацетилен	2,5	0,4	5
БКО-25	Кислород	20	1,7	25
БКО-50	Кислород	20	2,6	50
БВО-80	Водород	20	2,6	80
АР-150	Аргон	20	0,7	9,0
Г-70	Гелий	20	0,7	4,2
А-90	Азот	20	3,9	5,4
РС-250—58	Воздух	25	6,5	5,0

Из баллонов через редукторы газы поступают в горелку по специальным рукавам (ГОСТ 9356—76):

Класс рукава	I	III
Подаваемый газ	Ацетилен	Кислород
$P_{\text{раб}}$, МПа	0,63	2
Цвет внешнего слоя	Синий	Красный

Обычно используются рукава таких размеров:

Диаметр, мм				
внутренний	$6 \pm 0,5$	$9 \pm 0,5$	$12 \pm 0,5$	$16 \pm 0,5$
наружный	$14 \pm 0,5$	$18 \pm 0,5$	$22,5 \pm 1,0$	$26 \pm 1,0$

Рукава крепятся к ниппелям с помощью хомутов.

Основным инструментом при газовой сварке, наплавке и резке является горелка, в которой смешиваются горючий газ с кислородом, а на выходе образуется сварочное пламя. Наибольшее распространение получили инжекторные горелки, характеристики которых приведены в табл. 10.3.

Таблица 10.3. Технические характеристики инжекторных горелок

Номер нако- нечника	Расход, л/ч		$P_{\text{газ}}$ на входе в горелку, МПа	
	ацетилена	кислорода	ацетилена	кислорода
0	40–50	45–55	0,001–0,1	0,15–0,3
1	65–90	70–100	0,001–0,1	0,15–0,3
2	130–180	140–200	0,001–0,1	0,2–0,3
3	250–350	270–380	0,001–0,1	0,2–0,3
4	420–600	450–650	0,001–0,1	0,2–0,3
5	700–950	750–1000	0,001–0,1	0,2–0,3
6	1130–1500	1200–1650	0,001–0,1	0,2–0,35
7	1800–2500	2000–2500	0,01–0,1	0,25–0,4
8	2500–4500	3100–5000	0,03–1,0	0,25–0,5
9	4500–7000	4700–9000	0,03–1,0	0,25–0,5

Для электрических способов сварки цветных металлов используется не только современное оборудование, но и множество аппаратов и устройств, изготовленных ранее на предприятиях СССР и в странах СНГ.

Согласно действующей структуре, они имеют условные обозначения, приведенные на рис. 10.1.



Рис. 10.1 Условное обозначение сварочного оборудования

Каждая цифра обозначает:

- 1 — тип изделия: А — автомат, агрегат; В — выпрямитель; П — преобразователь или полуавтомат; Т — трансформатор;
- 2 — вид сварки: Д — дуговая;
- 3 — способ сварки или назначение, конструктивные или технологические возможности оборудования: Г — источники питания

для сварки в защитных газах; полуавтоматы или автоматы для сварки в активных газах соответственно; И — полуавтоматы для сварки в инертных газах; полуавтоматы для сварки в активных и инертных газах; У — источники питания универсальные; Ф — автоматы для сварки под флюсом; О — полуавтоматы и автоматы для сварки без защиты дуги, т.е. для сварки открытой дугой; ФГ — автоматы для сварки под флюсом и в защитных газах; Б — агрегаты с бензиновым приводным двигателем; Д — агрегаты с дизельным приводным двигателем; Ж — источники питания с жесткой внешней вольт-амперной характеристикой; П — источники питания с пологопадающей характеристикой; М — трансформаторы с механическим регулированием тока, многопостовые источники питания; Э — трансформаторы с электрическим регулированием сварочного тока; К — трансформаторы с конденсаторами, которые увеличивают коэффициент мощности; 4 — конструктивные или технологические особенности оборудования: Ж — источники питания с жесткой вольт-амперной внешней характеристикой; М — источники питания многопостовые; И — источники питания и полуавтоматы для импульсно-дуговой сварки; У — установки универсального назначения; Ч — источники питания частотные; 5 — ток сварки: одна, две или три цифры — номинальный сварочный ток в сотнях ампер для автоматов, полуавтоматов, трансформаторов для сварки под флюсом; в десятках ампер для другого оборудования; 6 — номер модификации или регистрационный (две цифры); 7 — климатическое исполнение в соответствии с ГОСТ 15150–69: У — для районов с умеренным климатом; УХЛ — для районов с умеренным и холодным климатом; 8 — категория размещения оборудования согласно ГОСТ 15543–70: 1 — на открытом воздухе; 2 — при отсутствии влияния солнечного излучения и атмосферных осадков; 3 — в закрытом помещении; 4 — в отапливаемых помещениях (или охлаждаемых или вентилируемых); 5 — в помещениях с повышенной влажностью.

Отсутствие третьей буквы означает ручную дуговую сварку.

Например: обозначение изделия ТДМ-317–1У2 расшифровывается так: Т — трансформатор; Д — для ручной дуговой сварки; М — с механическим регулированием тока; 31 — на ток

до 315 А; 7 — регистрационный номер; 1 — номер модификации; У — для регионов с умеренным климатом; 2 — размещение в закрытом помещении;

обозначение изделия ВДГМ-1602У2 расшифровывается так: В — выпрямитель; Д — для дуговой сварки; Г — в среде защитных газов; М — многопостовой; 160 — номинальный ток 1600 А; 2 — регистрационный номер; У — климатическое исполнение для регионов с умеренным климатом; 2 — размещение при отсутствии солнечного излучения и осадков.

Все оборудование, как правило, питается от сети 380 В и только в отдельных случаях — от сети 220–230 В. Частота везде — 50 Гц.

10.2. Оборудование для ручной дуговой сварки

Оборудование для ручной дуговой сварки графитовым и плавящимся электродом. Такая сварка производится с использованием источников питания постоянного тока с крутопадающими внешними вольт-амперными характеристиками, которые обеспечивают небольшие отклонения сварочного тока и глубины проплавления детали во время случайных изменений длины дугового промежутка. Они универсальны, пригодны для сварки всех металлов и сплавов (кроме алюминиевых и магниевых сплавов) как в цеховых, так и в монтажных условиях (табл. 87).

Рабочим инструментом сварщика-ручника являются электрододержатели различных конструкций (табл. 10.4–10.6).

Таблица 10.4. Технические характеристики пассатижных электрододержателей

Параметр	ЭП-2	ЭП-3	ЭД-1201	ЭД-3102	ЭД-5001
Сварочный ток, А	250	500	125	315	500
Диаметр электрода, мм	До 5	6–8	1,6–3	2–6	4–10
Сечение присоединяемого кабеля, мм ²	50	70	25	50	70
Масса, кг	0,43	0,8	0,32	0,48	0,62

Таблица 10.5. Технические характеристики рычажных и зажимных электрододержателей

Параметр	ЭР-1	ЭР-2	ЭДС-1201	ЭДС-3101	ЭУ-3001	ЭУ-5001
Сварочный ток, А	300	500	125	315	315	500
Диаметр электрода, мм	До 6	6–8	До 4	3–6	3–6	5–6
Сечение присоединяемого кабеля, мм ²	50	70	25	50	50	70
Масса, кг	0,52	0,72	0,22	0,34	0,4	0,42

Таблица 10.6. Технические характеристики винтовых электрододержателей

Параметр	ЭВ-2	ЭВ-3	ЭВ-4
Сварочный ток, А	125	315	500
Диаметр электрода, мм	До 4	4–6	5–8
Сечение присоединяемого кабеля, мм ²	35	50	70
Масса, кг	0,24	0,37	0,5

Ручная сварка неплавящимся вольфрамовым электродом может выполняться на постоянном токе прямой полярности с использованием как стандартных универсальных источников питания (табл. 87), так и специальных источников питания (табл. 88).

Защитный газ подается из баллона через редукторы — расходомеры серий АР, А, Г (табл. 10.2), деления шкалы манометра низкого давления проградуированы в литрах в минуту. Для более точного контроля расхода газов применяются расходомеры-ротаметры различных типов (табл. 10.7).

Таблица 10.7. Характеристики ротаметров поплавкового типа серии РС

Марка	Материал поплавка	Пределы измерения, л/мин
РС-3А	Коррозионно-стойкая сталь	0,3–4
РС-3	Эбонит	0,65–6
	Дюралюминий	1,65–10,5
	Коррозионно-стойкая сталь	2–20

Окончание табл. 10.7

Марка	Материал поплавка	Пределы измерения, л/мин
РС-5	Эбонит	10–66
	Дюралюминий	16–105
	Коррозионно-стойкая сталь	24–170

Компания «Binzel» (Германия) предлагает расходомер, действующий подобно ротаметру, но с меньшей массой и габаритами. Он устанавливается на сопле горелки диаметром 28 мм и при движении газа позволяет определить его расход в пределах $5-20 \pm 1,25$ л/мин. Если диаметр сопла горелки больше или меньше 28 мм, можно изготовить соответствующий переходник.

По газовым рукавам защитный газ подается в шкаф управления установки, а оттуда через электрогазовый клапан к горелке. Горелки (табл. 89) являются частью специальных установок или постов сварки неплавящимся электродом цветных металлов и сплавов в среде защитных газов.

Сила сварочного тока регулируется сварщиком на рабочем месте; напряжение холостого хода уменьшается специальными регуляторами, которые имеются у любого источника питания, или балластными реостатами типа РБ (табл. 10.8), которые включают последовательно с дугой или с помощью микропроцессора.

Таблица 10.8. Технические характеристики балластных реостатов

Марка	$I_{\text{сн}}$, А	Габариты, мм	Масса, кг
РБ-201У2	200	580×355×648	30
РБГ-301	300	600×410×390	32
РБ-301У2	315	580×410×648	35
РБ-501У2	500	580×465×648	45

При сварке вольфрамовым электродом в защитных газах первичное зажигание дуги осуществляют бесконтактным способом, для чего применяют осцилляторы или возбудители дуги (табл. 10.9).

Таблица 10.9. Технические характеристики возбуждителей дуги

Параметр	ОСПЗ-300-М	УПД-1	ВИС-501	ВИР-101	ОСПЗ-2М
Напряжение сети питания, В	200	200	60–90	180–300	220
Род тока	Переменный	Пере- менный	Постоян- ный	Посто- янный	Перемен- ный
$I_{св}$, А	315	80; 200; 315	500	80	315

Возбудители дуги могут быть параллельного и последовательного соединения для питания дуги переменного и постоянного тока. Дугу можно возбуждать контактным способом, касаясь вольфрамовым электродом графитовой пластинки, с дальнейшим переносом дуги на изделие. Полуавтоматическая сварка вольфрамовым электродом предусматривает механизированную подачу электродной проволоки в плавильное пространство, для чего применяются специальные горелки (табл. ☁ 90).

Полуавтоматическая сварка плавящимся электродом выполняется аппаратурой, которая состоит из подающего механизма с направляющим шлангом и горелкой и соответствующим источником питания (табл. ☁ 91).

Существующая тенденция компоновки в аппаратуре подающего механизма и источника питания реализуется в двух вариантах. В первом варианте обе составляющие размещаются в одном корпусе: аппаратный шкаф, подающий механизм, источник питания и панель управления. Недостаток этой компактной системы в том, что при выходе из строя какой-либо ее составляющей возникают трудности с заменой ее на другую, исправную. Во втором варианте источник питания и подающий механизм со шкафом управления автономны и их легко заменить на однотипный или подобный. Стандартные полуавтоматы могут быть при необходимости укомплектованы специальными генераторами (табл. ☁ 92).

Генераторы импульсов включаются в сеть сварки параллельно с главным источником питания — выпрямителем.

Для сварки пульсирующей дугой асимметричным разнополярным током прямоугольной формы разработаны специали-

зированные источники питания И-126 и И-160, которые обеспечивают получение сварочного тока в пределах 100–800 А, продолжительность импульсов 4–15 мс, модуляцию пачек импульсов с частотой 0,5–10 Гц.

Сварочную проволоку из подающего механизма к горелке полуавтомата подают по гибкому направляющему шлангу, одновременно осуществляющему подачу сварочного тока (табл. 10.10). Сменные каналы для подачи проволоки позволяют значительно продлить срок эксплуатации сварочных горелок со шлангами за счет смены загрязненных каналов. В качестве сменных элементов используются спирали из стальной проволоки или ленты. При сварке проволокой из алюминиевых сплавов применяются каналы из тефлона или нейлона. Корпуса горелок снабжены воздушным охлаждением при токах до 300–350 А и водяным при больших токах. Они имеют изолированное газовое сопло или гильзу, контактный наконечник (мундштук) из сплава системы Cu–Cr–Zr и кнопку управления подачи проволоки (табл. 93).

Таблица 10.10. Технические характеристики гибких направляющих шлангов к горелкам сварочных полуавтоматов

Марка шланга	d_3 , мм	d , мм		Масса 1 м, кг
		внутреннего шланга	внешней резины	
КН-1,5	0,3–1,0	1,5±0,2	9,7	0,193
КН-2,5	1,0–1,6	2,5±0,2	10,7	0,237
КН-3,2	1,6–2,0	3,2±0,2	13,7	0,392
КН-4,7	2,0–3,2	4,7±0,2	15,2	0,496
КШПЕ-40	1,6–2,0	3,2±0,1	21,7	0,992
КШПЕ-75	1,6–2,0	3,2±0,1	25,7	1,397
КШП Maltilock Robacta* (производство «Fronius», Австрия)	0,8–1,6	—	—	1,7

*Длина шланга 2–3 м.

Автоматическая сварка неплавящимся электродом в защитных газах производится с помощью стандартных сварочных тракторов (табл. 94) и головок (табл. 95).

Автоматы того и другого типа поставляются вместе с горелками, характеристики которых приведены в табл. 96.

Для автоматической сварки вольфрамовым электродом неповоротных стыков труб применяют специализированные переносные автоматы (табл. 97).

Для автоматической сварки алюминиевых сплавов созданы специализированные аппараты, установки и комплексы. Так, для плазменной точечной сварки тонколистовых алюминиевых сплавов разработаны установки типа клещей с ручным или пневматическим приводом с источником питания в виде трехфазного плазмотрона.

Марка	Толщина	Производительность	Мощность	Масса листа
УДГТ-51	0,5–2,0	40	2,5	2,7
УДГТ-301	1–4	30	7	4,2

Для плазменной автоматической сварки алюминиевых сплавов разнополярным асимметричным током с прямоугольной формой волны разработана установка РТ 450 АС/ДС. Номинальная сила тока 450 А при ПВ = 60 %, диапазон регулирования в режиме «Plazma AC» 10–450 А, «Plazma DC» 5–450 А, диапазон регулирования тока дежурной дуги 5–50 А, время действия сварочного тока при заварке кратера 0–8 с, напряжение холостого хода 70 В, частота сварочного тока 40–250 Гц, диапазон регулирования частоты модулированного тока 0,25–2000 Гц, расход плазмообразующего газа 0,1–10 л/мин.

Для роботизированной плазменной сварки способом «Soft Plazma» компанией «Fronius» (Австрия) разработаны специальные установки, питаемые от источника с напряжением холостого хода 58 В и рабочим напряжением 10–16 В, током дежурной дуги 3–30 А, расходом плазмообразующего газа 0,3–10 л/мин с горелкой типа РТW 1500, которая работает в диапазоне сварочного тока 3–150 А при ПВ = 100 %; с диаметром плазменных сопел 1,5–3,0 мм.

Для механизированной микроплазменной сварки сотовых и других тонкостенных металлоконструкций из алюминиевых сплавов в ИЭС им. Е.О. Патона разработан целый комплекс оборудования. Автомат А-1342 предназначен для выполнения стыковых, угловых, торцевых и нахлесточных соединений тол-

шиной 0,2–2,0 мм; присадочный металл из мягкой алюминиевой проволоки диаметром 0,8–1,2 мм надежно подается со скоростью 5–50 м/ч, а тележка перемещается со скоростью 10–100 м/ч. Автомат оснащен плазмотроном ОБ-1213 мощностью 3 кВт и обеспечивает силу тока до 100 А, получая питание от специального аппарата А-1281. Автомат А-1284 предназначен для сварки продольных и поперечных торцевых швов секций сотовых конструкций. Сварка ведется без присадки плазмотроном ОБ-1213.

Автомат А-1284Б предназначен для сварки периферийных секций сотовых конструкций по четырехугольному контуру и состоит из двух самоходных тележек, осуществляющих взаимно перпендикулярные перемещения плазмотрона по заданному периметру.

Установка А-1578 предназначена для сварки продольных стыковых швов коробчатых элементов. Металл толщиной 0,5–2,0 мм сваривается на параметрах режима: $d_{wэ} = 1,2–1,6$ мм; $d_{прис} = 0,8–1,2$ мм; $V_{св} = 10–50$ м/ч.

Автоматическая сварка плавящимся электродом производится как под слоем флюса, так и в среде защитных газов с помощью сварочных тракторов и сварочных головок — подвесных и самоходных (табл. ☁ 98, ☁ 99).

Сварочные тракторы более компактны, имеют небольшие массу и габариты, их легко перемещать в пределах цеха, на монтажных площадках, непосредственно по изделию без направляющих, могут находиться внутри изделия.

Сварочные головки требуют обязательного наличия направляющих путей, имеют большие массу и габариты. Их применяют при сварке больших, пространственно разветвленных конструкций, а также для выполнения наплавочных работ.

Однако современная мировая тенденция проявляется в отказе от использования тракторов и головок в пользу гибких роботизированных комплексов для сварки в среде защитных газов. Это требует новых подходов к проектированию сварных конструкций, которые должны быть адаптированы к специфике новых условий сварки.

Для износостойкой наплавки предназначены специальные подвесные и самоходные головки (табл. ☁ 100).

Аппараты для сварки и наплавки в среде защитных газов плавящимся электродом снабжаются специальными горелками (табл. 10.11).

Таблица 10.11. Технические характеристики горелок для автоматической дуговой сварки плавящимся электродом в среде защитных газов

Марка	$I_{св}$, А	$d_э$, мм	Вид охлаждения	Размер, мм		Масса, кг
				Высота	Диаметр	
ГПА-160-100	160	0,6-1,6	Воздушное	100	14,16	0,365
ГПА-160-140	160	0,6-1,6	То же	140	14,16	0,415
А-1589М	250	1,6-3,0	Водяное	—	—	—
ГПА-315-140	315	1,6-3,0	То же	140	16,18	0,470
ГПА-315-180	315	1,6-3,0	—»—	180	16,18	0,540
ГПА-315-220	315	1,6-3,0	—»—	220	16,18	0,625

При массовом изготовлении изделий любых пространственных конструкций из алюминиевых и магниевых сплавов разной степени сложности рекомендуется использовать специальное оборудование габаритно-параметрического ряда УПСФ. Это позволяет на одном рабочем месте по единой программе осуществлять:

- ♦ сборку стыковых базовых плоскостей с контролем точности прижима кромок к элементам оснастки;
- ♦ фрезерование и зачистку торцов соединяемых кромок по специальной программе;
- ♦ сварку с использованием специальных головок;
- ♦ зачистку, упрочнение и правку сварных швов;
- ♦ контроль качества в сборочно-сварочной оснастке (табл. 10.12).

Таблица 10.12. Технические характеристики специализированных установок для сборки-сварки металлоконструкций из алюминиевых и магниевых сплавов

Координаты	Марка установки			
	УПСФ-2	УПСФ-3-1	УПСФ-3-2	УПСФ-4
Перемещение по оси X, мм	25000	11800	11800	7000
Перемещение по оси Y, мм	3600	2000	2000	1600
Перемещение по оси Z, мм	1250	1000	1000	800

Окончание табл. 10.12

Координаты	Марка установки			
	УПСФ-2	УПСФ-3-1	УПСФ-3-2	УПСФ-4
Угловые перемещения, град	270	270	270	270
Число управляемых программой координат:				
всего	10	9	11	11
одновременно	5	5	5	5

С целью улучшения качества сварных швов соединений путем их высокочастотной механической обработки применяют специальные установки (табл. 10.13).

Таблица 10.13. Технические характеристики установок для высокочастотной проковки

Оборудование и инструмент	«Квант», Россия	«Ультрамет», Украина
<i>Ультразвуковой генератор</i>		
Тип	ПГУ-1,2-27	ТУЗГ
Напряжение питания, В	380	230
Мощность, кВт	1,8	0,3
Регулирование выходной мощности генератора, кВт	0,6-0,8-1,0-1,2	—
Масса корпуса с генератором, кг	160	4,5
<i>Ручной ударный инструмент</i>		
Тип	Магнитострикционный	Пьезокерамический
Частота волновода, кГц	26,5-28,0	19,5-22,5
Амплитуда колебания торца волновода, мкм	24-40	14-22
Охлаждение	Водяное	Без охлаждения
Масса, кг	3,4	2,5
Наконечник с бойками (сменный):		
число игловок бойков, шт.	До 4	До 4

Окончание табл. 10.13

Оборудование и инструмент	«Квант», Россия	«Ультрамет», Украина
диаметр иголки-бойка, мм	2–4	2–5
длина иголки-бойка, мм	15–25	15–25
радиус сферы торцевой поверхности иголки-бойка, мм	2–4	2–5

Электронно-лучевая сварка производится на промышленном оборудовании, разработанном в ИЭС им. Е.О. Патона (табл. 101).

Особенностью конструкции электронных пушек с уровнями ускоряющих напряжений 60 и 120 кВт является возможность их использования как за пределами, так и внутри вакуумной камеры через систему затворов. Электронная лампа, включенная в качестве линейного проходного элемента, на начальной стадии аномального нестационарного процесса перехватывает на себя ускоряющее напряжение, и в течение нескольких миллисекунд электрическая прочность эмиссионной системы и ускоряющее напряжение на пушке полностью восстанавливаются.

Это дает возможность обеспечить бездефектное формирование шва на критическом участке и перекрытие кольцевого шва.

Использование высокочастотных источников питания позволяет уменьшить габариты и расширить диапазон регулирования ускоряющего напряжения, но такие источники питания не предназначены для работы в режиме импульсной модуляции, что является эффективным технологическим приемом. Они пригодны для мощностей до 18 кВт и условий отсутствия жестких требований к импульсному изменению тока. Наибольшее распространение получили промышленные установки трех типов:

- ♦ оборудованные вакуумными камерами относительно небольшого объема (от 0,2 до 3,5 м³) сварочной пушкой, стационарной или скользящей вдоль одной стенки;
- ♦ применяемые для сварки изделий более или менее компактной формы и снабженные тремя пушками, которые питаются от одного источника ускоряющего напряжения и одновременно

осуществляют сварку трех продольных швов, что значительно уменьшает сварочные деформации и повышает производительность труда. Электронный пучок каждой из пушек автоматически совмещается с соответствующим стыком с помощью системы вторичного электронного отображения поверхности «растр», а процесс сварки демонстрируется на мониторе в режиме реального времени;

- ◇ крупногабаритные универсальные установки с использованием внутренних камерных электронных пушек, которые перемещаются в пределах до 12 м с максимальной скоростью 120 м/ч с погрешностью позиционирования $\pm 0,05$ мм. В них реализована семикоординатная система сварочных перемещений: пушки по трем линейным и двум угловым координатам и свариваемого изделия по двум угловым (вращение и наклон).

Синхронное управление сварочными перемещениями и параметрами сварочного пучка реализуется системой с развитым интерфейсом CNC+PLC.

Электрическая контактная сварка производится с помощью стандартных и специализированных сварочных машин. Как правило, они универсальны — предназначены для сварки сталей широкого диапазона легирования и различных цветных металлов и сплавов. Приведенные ниже таблицы содержат сведения только относительно последних. На однофазных сварочных машинах переменного тока лучше свариваются титановые сплавы, в то время как при сварке алюминиевых сплавов требуется большая энергоемкость и происходит интенсивное загрязнение поверхностей деталей и электродов в связи с переходом металла электродов на поверхность изделия и наоборот. Характеристики этих машин приведены в табл. 102.

В сварочных машинах постоянного тока выпрямление тока осуществляется непосредственно во вторичном контуре машины мощными кремниевыми диодами по трехфазной одно-периодной или шестифазной двухполупериодной схемам. В низкочастотных машинах к трехфазному сварочному трансформатору подведено выпрямленное напряжение от трехфазного выпрямителя, собранного по мостовой схеме, а сварочный ток включается и регулируется тиристорами выпрямляющего блока. Продолжительность включения тока в этих

машинах обычно не превышает 0,5 с. Эти машины обладают большими возможностями, чем однофазные, — приемлемой формой импульса тока и относительно небольшой энергоемкостью. Они рекомендуются для сварки ответственных изделий из любых конструкционных металлов. Их характеристики приведены в табл. ☁ 103—☁ 106.

Конденсаторные сварочные машины наименее энергоемки и характеризуются особо жесткими сварочными импульсами. Их используют преимущественно для сварки легких сплавов, а также деталей небольшой и неравномерной толщины из достаточно пластичных металлов.

Силовая сеть конденсаторных машин состоит из двух частей — зарядной и разрядной. Батарея конденсаторов (типа МБ, ГВ) заряжается от силового выпрямителя, который питается от трехфазной или однофазной сети, разряд конденсаторов на сварочный трансформатор происходит через тиристорные или электромагнитные контакторы.

Регулирование амплитуды и продолжительности импульса сварочного тока осуществляется в этих сварочных машинах изменением напряжения зарядки или сменой емкости батареи конденсаторов, а также изменением коэффициента трансформации сварочного трансформатора. Их технические характеристики приведены в табл. ☁ 107.

Машины для стыковой сварки сопротивлением подобны по назначению и устройству, но отличаются по мощности и конструктивному исполнению отдельных узлов. С целью улучшения свойств в сварных соединениях предусмотрена возможность термической обработки стыков (отжига) в губках машин.

В некоторых машинах подогрев деталей происходит при небольших давлениях, осадка — при повышенных. Процесс сварки регулируется по укорочению деталей или температуре нагрева (пирометрическими устройствами). Некоторые машины комплектуются ножами для обрезки торцов проволок перед сваркой. Характеристики этих машин приведены в табл. ☁ 108.

Машины для стыковой сварки оплавлением работают как в непрерывном режиме, так и оплавлением с предварительным подогревом. Их изготавливают для общего (табл. ☁ 109) и специального (табл. ☁ 110) назначения.

В некоторых случаях предусматривается возможность выполнения термической обработки стыков в губках сварочной машины. Большинство машин снабжены устройствами для снятия грата в губках или в отдельных приспособлениях.

Для стыковой сварки разнородных цветных трудносваривающихся металлов, например титан + алюминий, разработана в РГТУ «МАТИ» им. К.Э. Циолковского установка «Стык-3». Сварка ведется в инертной атмосфере низкого давления, нагрев осуществляется импульсной электрической дугой.

Диаметр свариваемых труб, мм	6–26
Толщина стенки, мм	1–3
Диаметр свариваемых стержней, мм	3–16
Диапазон регулирования сварочного тока, А	50–800
Число импульсов сварочного тока	1–100
Длительность импульсов тока, с	0,02–2,0
Длительность пауз, с	0,02–2,0
Давление в камере при вакуумировании, Па	1–3
Давление инертного газа при сварке, кПа	0,1–10
Расстояние между зажимами, мм	5–40
Ход подвижного зажима при осадке, мм	0–12
Усилия осадки, кН	0,2–4,0
Производительность, сварок/ч	30
Масса установки, кг	400

Диффузионная сварка цветных металлов и сплавов в вакууме производится на специализированных и универсальных установках, характеристики которых приведены в табл. 111.

Установки типа МДВС предназначены для сварки медных шин толщиной до 30 мм, компенсаторов из медной и алюминиевой фольги и плетеного провода и т.д. с высокой производительностью за счет специальных приспособлений групповой загрузки изделий.

Для **холодной стыковой сварки** цветных металлов разработаны машины с пневматическими и гидравлическими приводами, их технические характеристики приведены в табл. 112.

Машины и устройства для холодной стыковой сварки прежде всего должны удовлетворять условию $P_{\text{зажатия}}/P_{\text{осадки}} \geq 1,5$.

Сварка трением осуществляется на специализированном оборудовании, технические характеристики которого приведены в табл. 113.

Для ультразвуковой сварки применяют машины и установки как общего назначения (для сварки металлов и пластмасс), так и специализированного (табл. 114).

10.3. Оборудование для термической резки

Кислородная резка титановых сплавов и никеля производится вручную инжекторными резаками в соответствии с табл. 10.14.

Таблица 10.14. Технические характеристики резаков для ручной кислородной резки

Марка	Толщина металла, мм	Номер внутреннего мундштука	Р, МПа		Q, м³/ч		Масса, кг
			кислорода	ацетилен	кислорода	ацетилена	
Р1	До 15	1	0,35	0,03–0,08	2	0,2	0,68
	15–50	2	0,45	0,03–0,08	4	0,3	0,68
	50–100	3	0,55	0,03–0,08	8,5	0,4	0,68
<i>Вставные резаки</i>							
РГС-70	3–70	—	0,3–0,6	Не менее 0,001	3–10	0,4–0,6	0,61
РГМ-70	3–50	—	0,3–0,5	То же	3–8	0,3–0,6	0,59

Механизированная полуавтоматическая резка производится с помощью переносных сварочных машин (табл. 10.15).

Таблица 10.15. Технические характеристики переносных газорезательных машин

Марка	Р, МПа	Q, м³/ч		V _{рез} , м/ч	Масса, кг	U, В
		кислорода	ацетилена			
«Радуга»	0,8	20	1,0	5,5–90	4,5	~110/127
«Смена»	0,8	20	1,0	6–240	4,2	36
Микрон-2	0,8	20	0,55	6–240	4,2	24
«Спутник-3» ²	0,6	12	0,65	9–45	16,6	24
«Орбита-2»	0,6	14	1,1	12–42	18,4	~220

¹ Для ацетилена 0,01–0,10 МПа.

² Оборудована одним резаком, остальные — двумя.

ГЛАВА 11 ОХРАНА ТРУДА И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

11.1. Электробезопасность

Основными опасностями и вредностями, которые приводят к производственным травмам при сварке и резке, являются:

- ◇ поражение электрическим током при электросварочных работах и электродуговой резке;
- ◇ поражение зрения и открытой поверхности кожи излучением электрической дуги;
- ◇ отравление организма вредными газами, пылью и испарением, которые выделяются при сварке и резке;
- ◇ травмы от взрывов баллонов со сжатыми газами, ацетиленовых генераторов и сосудов из-под горючих веществ;
- ◇ пожарная опасность и ожоги;
- ◇ механические травмы при заготовительных и сборочно-сварочных операциях, а также повреждение органов слуха при плазменной резке.

Поражение электрическим током происходит при касании токоведущих частей электропроводки и сварочной аппаратуры. Токи, протекающие через человеческое тело, большие 0,05 А при частоте 50 Гц, вызывают тяжелые последствия и даже могут привести к гибели человека.

Сопротивление человеческого организма в зависимости от его состояния (устомление, влажность кожи, состояние здоровья) изменяется в широких пределах — от 1,0 до 20 кОм. Напряжение холостого хода источников питания обычной дуги достигает 90 В, а при плазменной резке нужно учитывать большие значения — 180 В при ручной и до 500 В при машинной

резке. Поэтому при плохом самочувствии сварщика через него может пройти ток, близкий к смертельно опасному, – 0,09 А. Безопасным считается напряжение 36 В при переменном токе и 42 В при постоянном токе.

Электробезопасность обеспечивается: выполнением правил безопасной эксплуатации оборудования, надежной изоляцией токоведущих частей, применением защитных ограждений, автоблокировки, заземлением электрооборудования и его отдельных элементов, ограничением напряжения холостого хода источников питания (постоянного тока до 90 В, переменного до 75 В). Длина кабелей между сетевым рубильником и передвижаемым агрегатом не должна превышать 15 м. При работе в стесненных условиях, в закрытых емкостях сварочная установка должна иметь блокирующее устройство для автоматического отключения сварочной цепи или снижения напряжения при обрыве дуги до 12 В. При сварке на переменном токе можно использовать устройство типа БСНТ-4 для снижения вторичного напряжения источника питания.

Корпуса сварочных аппаратов, каркасы распределительных устройств и шкафов необходимо заземлять гибким медным проводом сечением не менее 6 мм² или стальным сечением не менее 12 мм². Температура нагрева отдельных частей сварочных агрегатов не должна превышать 75 °С. Индивидуальные средства защиты предполагают использование сухой и прочной спецодежды и рукавиц, обуви без металлических шпилек и гвоздей.

При сварке и резке должны соблюдаться следующие условия работы: прекращение работы во время дождя и снегопада при отсутствии укрытия; пользование резиновым ковриком, резиновым шлемом и галошами при работе внутри емкости, а также переносной лампой с напряжением не более 12 В. Ремонт электросварочного оборудования должен осуществляться в стационарных условиях только специалистами-электриками.

Защита органов зрения и открытой поверхности кожи. Электрическая сварочная дуга создает три вида излучения:

- ◇ световое — световые лучи ослепляют, так как их яркость значительно превышает допустимые нормы;
- ◇ ультрафиолетовое — даже при кратковременном воздействии в течение нескольких секунд приводит к заболеванию глаз —

электроофтальмии, проявляющейся в острой боли, рези в глазах, слезотечении, спазмах век. Длительное воздействие ультрафиолетового излучения приводит к ожогам кожи;

- ◇ инфракрасное излучение — при длительном воздействии приводит к помутнению хрусталика глаза (катаракте), что может быть причиной ухудшения и даже потери зрения; тепловое воздействие этих лучей также приводит к ожогам.

Защита зрения и кожи лица при дуговой сварке осуществляется с помощью щитков, масок или шлемов из жаростойких диэлектриков (фибры, пропитанной специальным раствором, фанеры и т.д.) с защитными стеклами — светофильтрами размером 52×102 мм, которые задерживают и поглощают излучение дуги, в том числе и стеклами типа «хамелеон».

Чтобы защитить окружающих от излучения дуги, работы производят в специальных кабинах, а при строительных и монтажных работах применяют переносные щиты и ширмы. Для защиты сварщика служит специальная одежда из прочного брезента или сукна, а иногда из специальной ткани.

Защита от отравления вредными газами, пылью и испарениями. Состав и количество вредных газов, пыли и испарений зависят от вида сварки, состава защитных сред (покрытия, флюса, газа), основного и присадочного металла. Количество сварочной пыли (аэрозоля) и легких соединений при сварке составляет от 10 до 150 мг на 1 кг расплавленного электродного металла. Основными ее составляющими являются оксиды железа (до 70 %), марганца, кремния, хрома, фтористые и другие соединения. Самыми вредными являются хром, марганец и фтористые соединения. Кроме того, воздух в рабочих помещениях загрязняется другими вредными газами — оксидами азота, углерода, фтористым водородом и др.

От выделяющихся вредных веществ особенно страдают рабочие при сварке и резке цветных металлов. Предельно допустимые концентрации (ПДК) этих веществ (табл. 11.1) часто превышаются на практике.

Так, при сварке плавящимся электродом плит из алюминиевого сплава АМг6 с использованием сварочной проволоки Св-АМг6 концентрация твердых составляющих сварочного аэрозоля (ТССА) намного больше, чем при использовании

вольфрамового электрода (табл. 11.2). Особенно строго должны выполняться правила техники безопасности при сварке меди и медных сплавов, так как и медь, и легирующие ее элементы интенсивно испаряются, а их пары чрезвычайно токсичны.

Таблица 11.1. ПДК вредных веществ в воздухе (на уровне дыхательных органов сварщика)

Свариваемые металлы, сплавы	Вещество и газовые соединения	ПДК, $\text{кг/м}^3 \cdot 10^{-6}$
Алюминий и сплавы на его основе	Алюминий	2
Медь и сплавы на ее основе	Медь (металл) и ее оксиды	1
	Оксид марганца	0,3
	Оксид кремния	1
	Оксиды никеля	0,5
	Оксид цинка	5
	Оксиды азота	5
	Озон	0,1
	Алюминий	2
Бериллиевая бронза	Бериллий и его соединения	0,01
Свинец	Свинец и его соединения	0,01
Соединения водорода	Фтористый водород	0,5

Примечание. При сварке вольфрамовым электродом его ПДК = $6 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3$, при газовой сварке с использованием флюсов ПДК борной кислоты $10 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3$ и борного ангидрида $5 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3$.

Из сравнения данных табл. 11.1 и 11.2 следует, что содержание почти всех веществ около органов дыхания сварщика намного больше допустимых норм. Поэтому местные пылегазоприемники необходимо размещать непосредственно возле сварочной ванны, а производительность стационарных или передвижных устройств должна быть не менее $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$.

В фильтровентиляционных аппаратах нужно использовать фильтры, очищающие воздух не только от ТССА, но и от озоносодержащих составляющих сварочного аэрозоля. Среди них наиболее опасны цинк, свинец и бериллий. При сварке меди и некоторых ее сплавов применяются азот и аргон, которые из-за боль-

шего удельного веса могут вытеснять кислород из помещения; это особенно опасно при работе в замкнутых помещениях (емкостях), что нужно учитывать при установке отсосов местной и общей вентиляции. Для контроля содержания азота и аргона в таких помещениях забор воздуха должен проводиться с помощью автоматического газоанализатора постоянного действия.

Таблица 11.2. Содержание вредных веществ в воздухе при сварке алюминиевых сплавов в среде инертных газов

Место отбора проб	Компонент сварочного аэрозоля	Средняя концентрация, $\text{кг/м}^3 \cdot 10^{-6}$
<i>Сварка плавящимся электродом</i>		
0,2 м от дуги	TC CA	320
	Al_2O_3	170
	MgO	20
	MnO_2	2,5
	Fe_2O_3	3,5
	O_3	0,2
	CO	6,3
	NO	9,0
4 м от дуги	TC CA	1,3
	Al_2O_3	1,4
	MgO	0,3
	O_3	0,04
<i>Сварка вольфрамовым электродом</i>		
0,2 м от дуги	TCCA	2,5
	O_3	0,02
	CO	12,5
	NO	3,7

При сварке конструкций на передвижных рабочих местах нужно применять вентиляционные устройства эжекторного типа; расчетный воздушный обмен должен быть не менее $11\,000 \text{ м}^3/\text{кг}$ расходуемой электродной проволоки.

Бериллиевую бронзу можно сваривать только в закрытых камерах с вытяжной вентиляцией со скоростью движения воздуха в рабочем проеме камеры не менее 1 м/с , а выходные от-

верстия вакуумных насосов должны присоединяться к местной вентиляции. Очистка камеры от нагара после сварки выполняется только влажным способом 5%-ным раствором соляной кислоты, при включенной местной вытяжной вентиляции, а сварщик должен использовать респиратор «Лепесток».

Отравляющие вещества вызывают кратковременное отравление, что проявляется в виде обморочного состояния, головной боли, рвоты, слабости и др., а также могут откладываться в тканях организма человека и вызывать хронические заболевания. Особое внимание нужно обращать на концентрацию марганца, ибо его наличие в воздухе более $0,3 \text{ мг/м}^3$ может вызвать тяжелые заболевания нервной системы.

Наиболее вредным процессом является ручная дуговая сварка покрытыми электродами, а при механизированных способах количество вредных выделений значительно меньше.

11.2. Пожарная безопасность

Причинами пожара при сварочных и резательных работах могут быть искры и капли расплавленного металла и шлака, температура которых достигает $1800\text{--}1900^\circ\text{C}$, неосторожное обращение с пламенем горелки при наличии горючих материалов вблизи рабочего места сварщика. Опасность возникновения пожара особенно велика на строительно-монтажных площадках и при ремонтных работах в помещениях, не приспособленных для сварки.

Согласно Правилам пожарной безопасности при проведении сварочных и других огневых работ на объектах народного хозяйства, места, где выполняются огневые работы, оснащаются огнетушителями, ящиками с песком, лопатами и совками, бочками или ведрами с водой. Деревянные конструкции, расположенные ближе 5 м от сварочных постов, оштукатуривают или обивают листовой сталью по брезенту, смоченному в глинистом растворе. Деревянные полы, настилы, помосты при необходимости также защищаются листами стали. В зоне попадания брызг металла и искр не должно быть легковозгорающихся предметов. Легковозгорающиеся и взрывоопасные ма-

териалы должны находиться на расстоянии не менее 30 м от места сварки.

Сварочные работы в емкостях из-под горючих продуктов выполняют только после их тщательной очистки от остатков продуктов и двух-трехкратного промывания горячим 10%-ным раствором щелочи с последующей продувкой паром или воздухом. Газопроводы можно ремонтировать только после их тщательной продувки.

11.3. Основные источники опасности при сварке и резке цветных металлов

Основными источниками опасности при *газовой сварке и резке* являются:

- ♦ взрывы ацетиленовых генераторов от обратного удара пламени, когда не срабатывает водяной затвор;
- ♦ взрывы кислородных баллонов в момент их открытия, если на штуцер баллона или на клапаны редуктора попало масло;
- ♦ неосторожное обращение с горелкой сварщика, что является причиной пожарной опасности в помещении, возгорания волос и одежды, ожогов;
- ♦ игнорирование сварщиком очков-светофильтров, что может стать причиной ожогов и повреждения глаз;
- ♦ отсутствие приточно-вытяжной вентиляции в помещении, из-за чего возможно отравление вредными газами, которые накопились в помещении.

Безопасная работа при газовой сварке и резке возможна только при правильном обращении с материалами, оборудованием и аппаратурой в соответствии с Правилами техники безопасности и производственной санитарии при получении ацетилена, кислорода и газопламенной обработке металлов.

К выполнению газосварочных и газорезательных работ допускаются работники не моложе 18 лет, которые прошли специальное обучение с проверкой знаний безопасной работы.

Запрещается работа без водяного затвора или при неисправном водяном затворе; нельзя к одному водяному затвору присоединять несколько горелок или резаков.

Необходимо строго выполнять правила обращения и эксплуатации ацетиленовых генераторов: карбид кальция нужно хранить в сухом, хорошо проветриваемом, огнестойком помещении; на месте выполнения работы карбид кальция хранят в неповрежденных барабанах с плотно закрытой крышкой; барабаны открывают только специальным инструментом во избежание образования искр; не подвергают барабаны ударам и толчкам.

При сварке цветных металлов часто применяется предварительный, а иногда и сопутствующий подогрев, который реализуется за счет сгорания горючих газов в смесях с кислородом. Такие смеси могут быть взрывоопасными даже при наличии искр; соотношения их с воздухом и кислородом приведены в табл. 11.3.

Таблица 11.3. Предельные соотношения взрывоопасных смесей

Горючее	Объемная доля горючего в смеси, %	
	С воздухом	С кислородом
Ацетилен	2,3–100	2,1–100
Водород	3,3–81,5	4,6–93,9
Метан	4,8–16,7	5–59,2
Природный газ	4,8–14	5–59,2
Пропан	2–9,5	2–48
Бутан	1,5–8,5	1,3–47
Пары бензина	0,7–6	2,1–28,4
Пары керосина	1,4–5,5	2–28

Кроме того, кислород активно реагирует с жировыми веществами или с твердым топливом, находящимся в мелкодисперсном виде, что приводит к их окислению, а образовавшаяся при этом теплота служит причиной самовозгорания, которое активно поддерживается кислородом. Это вызывает ожоги у рабочих и становится причиной пожаров.

Кислородные баллоны следует защищать от толчков и ударов при транспортировании и хранении. Их можно транспортировать на рессорных транспортных средствах, специальных ручных тележках и носилках, в специальных контейнерах. Баллоны должны быть надежно закреплены в вертикальном положении на значительном расстоянии от нагревательных прибо-

ров и в защищенном от солнечных лучей месте. Запрещается совместное хранение баллонов с горючими газами и кислородом. Не допускается эксплуатация грязных, со вмятинами и царапинами, несвоевременно освидетельствованных баллонов. Особенное внимание следует обращать на отсутствие масла или грязи на штуцере вентиля кислородных баллонов.

Во время газопламенной обработки сварщики должны работать в спецодежде, рукавицах и защитных очках со стеклами Г-1, Г-2, Г-3, а вспомогательные рабочие — в очках со стеклами В-1, В-2, В-3. С увеличением мощности пламени нужно применять стекло с большим номером.

При выполнении газопламенных работ внутри отсеков, ям, резервуаров, где возможно накопление вредных газов, должны работать переносные приточно-вытяжные вентиляторы.

Плазменная резка сопровождается сильным шумом, который в сочетании с ультразвуковым эффектом опасен для обслуживающего персонала. Действующими нормами установлены допустимые уровни звукового давления в зависимости от частоты шума (табл. 11.4).

Таблица 11.4. Допустимые нормы шума при плазменной резке на расстоянии 0,5 м от плазмотрона

Место измерения шума	Уровень шумового давления, дБ, для средних частот октавных полос, Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
На рабочем месте	90	92	86	83	80	78	76	74
То же самое при использовании противошума НИИОТ-2	—	—	102	102	107	114	120	113
Вытяжная вентиляция (вентилятор вне помещения)	67	67	66	57	48	43	39	40

Влияние рабочего напряжения на уровень шума более существенно, чем силы рабочего тока. Так как уровень шума на расстоянии 1 м снижается на 6 дБ, на расстоянии 4 м — на 16 дБ, то при механизированной резке практикуются дистанционные методы управления процессом резания. При ручной резке работник находится рядом с плазмотроном, поэтому его следует обеспечить противошумными наушниками или противошум-

ными касками ВЦНИИОТ-2М с наушниками, которые защищают от искр, механических травм головы и высокочастотного шума интенсивностью до 120 дБ.

Кроме того, надо ограничивать суммарную продолжительность влияния шума на оператора в течение одной смены. Действующими нормами предусматриваются поправки в табл. 11.4 при превышении допустимого уровня шума на 6–12 дБ за счет ограничения продолжительности воздействия шума до 4 и 1 ч.

При плазменной резке выделяется много газов, паров от разрезаемых металлов и аэрозолей от химических соединений, особенно оксидов меди и цинка. Эти выделения удаляются за счет обменной вентиляции и обязательного дополнительного отсоса газов и пыли от мест их образования. При ручной резке постоянное рабочее место должно быть оборудовано столом с нижнебоковым отсосом воздуха кратностью обмена до 6000–12 000 м³/ч. При резке меди и ее сплавов необходимо использовать шланговые противогазы с принудительной подачей воздуха к органам дыхания или фильтрующие шланговые противогазы, респираторы «Лепесток», «Астра» и т.д.

Травмы (удары, порезы) при заготовительных и сборочно-сварочных работах вызваны нарушением правил безопасного выполнения работ на металлорежущем оборудовании (гильотинные ножницы, универсальные пресс-ножницы, гибочные вальцы и т.д.), отсутствием устройств для транспортирования и складывания тяжелых деталей, неисправностью транспортных средств — тележек, цепей, тросов, захватов, нарушением правил такелажных работ, неисправностью инструмента — молотков, зубил, кувалд, ключей, домкратов и т.п.

Во всех несчастных случаях прежде всего нужно вызвать скорую помощь, после чего немедленно приступить к оказанию первой помощи собственными силами. Эта помощь ограничивается остановкой кровотечения, перевязкой раны или ожога, искусственным дыханием, наложением неподвижной повязки (шины) при переломе, переносом и перевозом потерпевшего.

В аптечке первой помощи на участке или в бригаде должны быть: раствор йода спиртовой, бинты, вата, раствор борной кислоты, цинковые капли, пипетки, нашатырный спирт, подушка с кислородом, питьевая сода, марганцовокислый калий,

эфирно-валериановые капли, складные фанерные шины, вещество «Ливия».

При поражении электрическим током нужно освободить потерпевшего от электрических проводов (с соблюдением техники безопасности), обеспечить доступ свежего воздуха, при потере сознания приступить к восстановлению дыхания.

В случае электроофтальмии на глаза нужно положить вату, смоченную в холодной воде, или в слабом растворе питьевой соды, или в 2%-ном растворе борной кислоты, а потерпевшего перевести в темное помещение.

Если произошло возгорание одежды на работнике, нужно на него накинуть брезент, мешок, одеяло и т.п. и прижать к телу, а при наличии воды — облить его водой. Если человек потерял сознание, следует вынести его на свежий воздух, дать понюхать нашатырного спирта.

При тяжелых ожогах с пострадавшего осторожно снимают одежду и обувь (лучше разрезать их), обожженное место смазывают веществом «Ливия», покрывают стерильным материалом, накладывают вату и перевязывают.

Ожоги химических веществ смачивают водой в течение 10—15 мин. При ожогах кислотой делают примочки из содового раствора, при ожогах щелочью — из раствора борной кислоты или слабого раствора уксуса.

При отравлении газами нужно вынести потерпевшего на свежий воздух, расстегнуть одежду, дать понюхать нашатырный спирт, растереть кожу, согреть, если холодно, сделать искусственное дыхание, дать подышать кислородом, особенно при отравлении СО.

В случае перегрева при работе летом на открытом воздухе (тепловой удар) потерпевшего нужно перенести в прохладное место, снять одежду, смочить голову и участок сердца холодной водой, дать понюхать нашатырный спирт. При остановке дыхания сделать искусственное дыхание; когда потерпевший придет в себя, дать выпить ему воды с солью.

Основными мероприятиями по снижению травматизма являются продуманные с точки зрения безопасности работ технология и техника заготовки, сборки и сварки металлоконструкций, правильное оснащение всех рабочих мест и выполнение персоналом правил техники безопасности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Абрамович В.Р., Тимофеев В.Н.* Справочник по сварке и пайке судовых трубопроводов. Л. : Судостроение, 1982. 112 с.
2. *Абрамович В.Р., Демянцевич В.П., Ефимов Л.А.* Сварка плавлением меди и сплавов на медной основе. Л. : Машиностроение, 1988. 215 с.
3. *Алюминий и его сплавы в современных сварных конструкциях / А.Я. Ищенко, Т.М. Лабур.* Киев : Экотехнология, 2006. 112 с.
4. *Амигуд Д.З.* Справочник молодого газосварщика и газорезчика. 2-е изд., испр. и доп. М. : Высшая школа, 1977. 188 с.
5. *Биковський О.Г.* Довідник зварника, Киев : Основа, 2014. 448 с.
6. *Биковський О.Г., Лутов Д.М., Пінковський І.В.* Технологія та обладнання електричного контактного зварювання : навч. посіб. Киев : Техніка, 2001. 240 с.
7. *Быковский О.Г., Петренко В.Н., Пешков В.В.* Справочник сварщика. М. : Машиностроение, 2011. 336 с.
8. *Васильев К.В.* Плазменно-дуговая резка. М. : Машиностроение, 1974. 111 с.
9. *Гуревич С.М.* Справочник по сварке цветных металлов. Киев : Наукова думка, 1981. 608 с.
10. *Диффузионная сварка титана / Э.С. Каракозов, Л.М. Орлова, В.В. Пешков, В.М. Григорьевский.* М. : Металлургия, 1977. 272 с.
11. *Илющенко В.М., Лукьянченко Е.П.* Сварка и наплавка меди и сплавов на ее основе. Киев : Международная ассоциация «Сварка». 2013. 396 с.
12. *Литейные бронзы ; под ред. К.П. Лебедева.* Л. : Машиностроение, 1973. 312 с.
13. *Лопатин Н.И.* Технология изготовления сварных конструкций из алюминиевых сплавов. Л. : Судостроение, 1984. 136 с.
14. *Макаров В.П., Скачков Ю.Н.* Сварка магниевых сплавов. М. : Машиностроение, 1972. 120 с.
15. *Мальцев М.В.* Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. 2-е изд. М. : Металлургия, 1970. 364 с.
16. *Мельниченко Н.Т.* Монтаж и сварка конструкций из нержавеющей стали и алюминия. Л. : Машиностроение, 1968. 208 с.
17. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Б.А. Колачев, В.А. Ливанов, В.И. Елагин [и др.].* М. : Металлургия, 1972. 480 с.
18. *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / С.М. Гуревич, В.Н. Замков, В.Е. Блашук [и др.].* 2-е изд., доп. и перераб. Киев : Наукова думка, 1986. 240 с.
19. *Миличенко С.Л., Быковский О.Г.* Ремонт наплавкой питателей установок непрерывной варки целлюлозы. М. : Лесная промышленность, 1973. 40 с.
20. *Николаев Г.А., Фридландер И.Н., Арбузов Ю.П.* Свариваемые алюминиевые сплавы. М. : Металлургия, 1990. 296 с.
21. *Овчинников В.В.* Технология сварки алюминиевых сплавов : учеб. пособие. М. : МГИУ, 2004. 68 с.
22. *Плазменная наплавка металлов /А.К. Вайнерман, М.Л. Шоршоров, В.Д. Веселков, В.С. Новосадов.* Л. : Машиностроение, 1969. 192 с.
23. *Псарас Г.Г., Ежель А.И.* Сварщику цветных металлов : справочное пособие. Донецк : Донбасс, 1982. 151 с.

24. *Рабкин Д.М.* Металлургия сварки плавлением алюминия и его сплавов. Киев : Наукова думка, 1986. 256 с.
25. Пористость при сварке цветных металлов / В.В. Редчиц, В.А. Фролов, В.А. Казаков, В.И. Лукин. М. : Технология машиностроения, 2002. 448 с.
26. *Руге Ю.* Техника сварки : справочное изд. В 2 ч. ; пер. с нем. М. : Металлургия ; Машиностроение, 1984. 552 с.
27. *Рябов В.Р.* Сварка алюминия и его сплавов с другими металлами. Киев : Наукова думка, 1983. 264 с.
28. *Рябов В.Р.* Сварка композиционных материалов : обзор. Киев : ИЭС им. Е.О. Патона, 1990. 60 с.
29. *Сахацкий Г.П.* Технология сварки металлов в холодном состоянии. Киев : Наукова думка, 1979. 296 с.
30. Сварка алюминиевых сплавов криогенного и общего назначения ; отв. ред. Д.М. Рабкин. Киев : Наукова думка, 1984. 152 с.
31. Сварка разнородных металлов и сплавов / В.Р. Рябов, Д.М. Рабкин, Р.С. Курочко, Л.Г. Стрижевская. М. : Машиностроение, 1984. 239 с.
32. Сварка цветных металлов : сб. науч. трудов. Киев : Наукова думка, 1989. 212 с.
33. Сварочные материалы для дуговой сварки : справочное пособие. В 2 т. Т. 1: Защитные газы и сварочные флюсы / Б. Конишев, С.А. Курланов, Н.Н. Потапов [и др.] ; под общ. ред. Н.Н. Потапова. М. : Машиностроение, 1989. 544 с.
34. *Смирягин А.П., Смирягина Н.А., Белова А.В.* Промышленные цветные металлы и сплавы. 3-е изд. М. : Металлургия, 1974. 488 с.
35. Справочник молодого газосварщика и газорезчика : справочное пособие для ПТУ/ Н.И. Никифоров, С.П. Нешумова, И.А. Антонов [и др.]. М. : Высшая школа, 1990. 239 с.
36. Справочник сварщика-судостроителя / В.Р. Абрамович, В.П. Бочкарев, Л.Б. Глушаков [и др.]. Л. : Судостроение, 1981. 272 с.
37. *Ширшов И.Г., Котиков В.И.* Плазменная резка. Л. : Машиностроение, 1987. 192 с.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИКА СВАРКИ АЛЮМИНИЯ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ	9
1.1. Сварка плавлением алюминия и алюминиевых сплавов	9
1.2. Газовая сварка алюминия и алюминиевых сплавов	20
1.3. Ручная дуговая сварка	23
1.4. Механизированная сварка неплавящимся электродом	34
1.5. Плазменно-дуговая сварка	37
1.6. Механизированная сварка плавящимся электродом	40
1.7. Автоматическая сварка плавящимся электродом в защитных газах	49
1.8. Автоматическая сварка с использованием флюса	55
1.9. Электрошлаковая сварка	57
1.10. Электронно-лучевая сварка	58
1.11. Гибридная сварка	60
1.12. Электрическая контактная сварка	61
1.13. Шовная сварка	68
1.14. Стыковая сварка	72
1.15. Холодная сварка алюминия и его сплавов	80
1.16. Сварка трением	92
1.17. Ультразвуковая сварка	95
1.18. Ремонтные работы	96
1.19. Сварка трубопроводов из алюминия и его сплавов	102
ГЛАВА 2. МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ	105
2.1. Маркировка и свариваемость материалов	105
2.2. Газовая сварка	108
2.3. Аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом	108
2.4. Сварка плавящимся электродом	109
2.5. Электрическая контактная сварка (точечная и шовная)	111
2.6. Ремонтные работы	111
ГЛАВА 3. ТИТАН И ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ	113
3.1. Маркировка и свариваемость титана и титановых сплавов	113
3.2. Сварка вольфрамовым электродом	117
3.3. Плазменная сварка	125
3.4. Сварка под флюсом	127
3.5. Электрошлаковая сварка	129
3.6. Электронно-лучевая сварка	131
3.7. Электрическая контактная сварка	135
3.8. Сварка в твердой фазе	140
3.9. Ремонт изделий из титановых сплавов	143
ГЛАВА 4. СВАРКА МЕДИ И ЕЕ СПЛАВОВ	144
4.1. Маркировка и свариваемость меди	144
4.2. Газовая сварка меди	146
4.3. Ручная дуговая сварка меди графитовым электродом	148
4.4. Автоматическая сварка	153

4.5. Электрическая контактная сварка	162
4.6. Сварка меди в твердой фазе	165
4.7. Сварка латуней	169
4.8. Сварка алюминиевых бронз	180
4.9. Сварка оловянистых бронз	196
4.10. Сварка кремнемарганцевых бронз	201
4.11. Сварка медно-никелевых сплавов	204
4.12. Изготовление трубопроводов из меди и медно-никелевых сплавов	210
ГЛАВА 5. СВАРКА НИКЕЛЯ И ЕГО СПЛАВОВ	231
5.1. Маркировка и свариваемость никеля и его сплавов	231
5.2. Технология и техника сварки и наплавки никеля и никелевых сплавов	233
ГЛАВА 6. СВАРКА СВИНЦА	240
6.1. Особенности сварки свинца	240
6.2. Технология и техника сварки и наплавки свинца	241
ГЛАВА 7. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ В СОСТАВЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ	244
7.1. Особенности металлических композитных материалов	244
7.2. Технология, техника сварки и наплавки металлических КМ	246
ГЛАВА 8. РАЗНОРОДНЫЕ СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ	262
8.1. Особенности разнородных сварных соединений	262
8.2. Технология и техника сварки пары металлов алюминий + медь	264
8.3. Технология и техника сварки пары алюминий + титан	269
8.4. Технология и техника сварки пары титан + медь	279
8.5. Технология и техника сварки пары алюминиевый сплав + магниевый сплав	283
ГЛАВА 9. ТЕРМИЧЕСКАЯ РЕЗКА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ	285
9.1. Особенности современных способов термической резки цветных металлов	285
9.2. Технология и техника методов термической резки цветных металлов	287
ГЛАВА 10. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СВАРКИ И РЕЗКИ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ	302
10.1. Особенности оборудования для сварки и наплавки цветных металлов и сплавов	302
10.2. Оборудование для ручной дуговой сварки	306
10.3. Оборудование для термической резки	319
ГЛАВА 11. ОХРАНА ТРУДА И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ	322
11.1. Электробезопасность	322
11.2. Пожарная безопасность	327
11.3. Основные источники опасности при сварке и резке цветных металлов	328
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	333







СВАРКА И РЕЗКА

ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Учебное пособие

Допущено Учебно-методическим объединением
высших учебных заведений РФ по образованию
в области материаловедения, технологии материалов
и покрытий в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки
бакалавров 150100 «Материаловедение и технологии
материалов»



Уважаемый читатель!

Вы держите в руках книгу, дополнительные материалы которой
доступны Вам **БЕСПЛАТНО** в Интернете на www.znanium.com.
Специального программного обеспечения не требуется



Электронно-
Библиотечная
Система
znanium.com

ISBN 978-5-98281-392-3

