



ДЛЯ ТЕХНИКУМОВ

С.И. Думов

ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ

Третье издание,
переработанное и дополненное

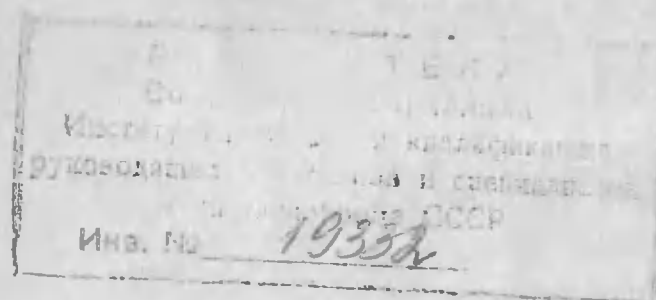
*Допущено Министерством высшего и среднего специального
образования СССР в качестве учебника для учащихся
машиностроительных техникумов*



Ленинград
"Машиностроение"
Ленинградское отделение
1987

ББК 34.641я7
Д82
УДК 621.791.7.011 (075.3)

Рецензент Б. Н. Гололобов



Думов С. И.

Д82 Технология электрической сварки плавлением —
Учебник для машиностроительных техникумов. —
3-е изд., перераб. и допол. — Л.: Машиностроение.
Ленингр. отд-ние, 1987. — 461 с.: ил.

(В пер.) 1 р. 10 к.

Д 2704060000-058 58-87
038 (01)-87

ББК 34.641я7
6П4.3

© Издательство «Машиностроение», 1978.

© Издательство «Машиностроение», 1987, с изменениями.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В решении задач, намеченных XXVII съездом КПСС по улучшению качества продукции, эффективности производства и дальнейшему подъему социалистической экономики, сварке отводится значительное место. Определены основные направления развития сварочного производства в нашей стране: замена клепаных, литых, кованных конструкций более экономичными — сварными; строительство специализированных предприятий и цехов для централизованного изготовления сварных конструкций; внедрение износостойкой наплавки деталей машин и механизмов; расширение производства сварочных материалов; внедрение высокопроизводительных методов автоматической сварки.

Сварка широко применяется в основных отраслях производства, потребляющих металлопрокат, так как резко сокращает расход металла, сроки выполнения работ и трудоемкость производственных процессов. Сварка может также выполняться под водой.

Выпуск сварных конструкций и уровень механизации сварочных работ растет из года в год. Получаемая за счет применения сварки ежегодная экономия в народном хозяйстве исчисляется многими сотнями миллионов рублей.

Достигнутые успехи в области автоматизации и механизации сварочных процессов позволили коренным образом изменить технологию изготовления таких важных объектов, как доменные печи, мосты, трубопроводы, суда, химическое оборудование, гидротурбины.

Применение сварки способствует совершенствованию машиностроения и развитию новых отраслей техники — ракетостроения, атомной энергетики, радиоэлектроники.

Сварка позволяет уменьшить затраты на единицу продукции, сократить длительность производственного цикла, улучшить качество изделий.

Проводятся работы по выполнению сварки и резки в открытом космосе. Впервые в открытом космосе была осуществлена автоматическая сварка и резка в 1969 г. космонавтами Валерием Кубасовым и Георгием Шониним. Продолжая эти работы в 1984 г., космонавты Светлана Савицкая, Владимир Джанибеков, используя разработанный Институтом электросварки им. Е. О. Патона специальный универсальный ручной инструмент, провели в открытом космосе ручную сварку, резку и пайку различных металлов и продолжили работы по напылению металлических покрытий. Тем самым созданы условия в недалеком будущем для выполнения монтажно-сварочных работ в открытом космосе.

В настоящем учебнике описана технология всех способов электрической сварки плавлением в соответствии с программой для техникумов, выпускающих специалистов сварочного производства. При этом особое внимание уделено новым перспективным видам и способам сварки. В книге рассмотрены вопросы теории сварочной дуги, тепловых и металлургических процессов сварки, сварочных напряжений и деформаций, сварки легированных сталей, разнородных металлов, цветных металлов, а также технологии изготовления сварных конструкций.

Материал учебника базируется на сведениях по химии, физике, технологии металлов, электротехнике, а также на ряде специальных одновременно изучаемых предметов.

Автор будет благодарен всем читателям книги за замечания и пожелания, которые следует направлять по адресу: 191065, Ленинград, ул. Дзержинского, 10, ЛО изд-ва «Машиностроение».

ВВЕДЕНИЕ

Сварка является одним из ведущих технологических процессов обработки металлов. Большие преимущества сварки обеспечили ее широкое применение в народном хозяйстве; без нее сейчас немыслимо производство судов, турбин, котлов, самолетов, мостов, реакторов и других конструкций. *Сваркой называется технологический процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между свариваемыми частями при их местном или общем нагреве, или пластическом деформировании, или совместным действием того и другого.*

Сварное соединение металлов характеризуется непрерывностью структур. Для получения сварного соединения необходимо осуществить межмолекулярное сцепление между свариваемыми деталями, приводящее к установлению атомарной связи в пограничном слое.

Если зачищенные поверхности двух соединяемых металлических деталей при сжатии под большим давлением сблизить настолько, чтобы могло возникнуть общее электронное облачко, взаимодействующее с ионизированными атомами обеих металлических поверхностей, получим прочное сварное соединение. На этом принципе осуществляется холодная сварка пластичных металлов.

При повышении температуры в месте соединения деталей амплитуды колебания атомов относительно постоянных точек их равновесного состояния увеличиваются, и тем самым создаются условия более легкого получения связи между соединяемыми деталями. Чем выше температура нагрева, тем меньшее давление требуется для осу-

ществления сварки, а при нагреве до температур плавления необходимое давление становится равным нулю.

Сварка плавлением осуществляется нагревом свариваемых кромок до температуры плавления без сдавливания свариваемых деталей.

Все существующие способы сварки могут быть разделены на две основные группы: сварку давлением (контактная, газопрессовая, трением, холодная, ультразвуком) и сварку плавлением (газовая, термитная, электродуговая, электрошлаковая, электронно-лучевая, лазерная).

Наибольшее распространение получили различные способы электрической сварки плавлением, а ведущее место занимает дуговая сварка, источником теплоты при которой служит электрическая дуга.

В 1802 г. русский ученый В. В. Петров (1761—1834 гг.) открыл электрический дуговой разряд и указал на возможность его использования для расплавления металлов. Своим открытием Петров положил начало развитию новых отраслей технических знаний, получивших впоследствии практическое применение сначала в электродуговом освещении, а затем при электрическом нагреве, плавке и сварке металлов. В 1882 г. русский инженер Н. Н. Бенардос (1842—1904 гг.), работая над созданием крупных аккумуляторных батарей, открыл способ электродуговой сварки металлов неплавящимся угольным электродом. Им были также разработаны способы дуговой сварки в защитном газе, дуговой резки металлов и др.

Способ дуговой сварки получил дальнейшее развитие в работах русского инженера Н. Г. Славянова (1854—1897 гг.), предложившего в 1888 г. производить сварку плавящимся металлическим электродом. С именем Славянова связано развитие металлургических основ электрической дуговой сварки, создание первого автоматического регулятора длины дуги и первого сварочного генератора. Им предложены флюсы, позволяющие получить высококачественный металл сварных швов.

Изобретения Бенардоса и Славянова были запатентованы и использованы не только в России, но и во всех промышленно развитых странах.

Отсталая промышленность дореволюционной России не смогла в должном объеме использовать дуговую сварку. Широкое промышленное применение и развитие сварки в нашей стране началось после победы Великой Октябрьской социалистической революции.

В развитии сварки в СССР наблюдались следующие особенности: в 1924—1935 гг. сварочные процессы осуществлялись вручную электродами без покрытия или с тонкими ионизирующими покрытиями. Уже тогда под руководством В. П. Вологодина были изготовлены первые сварные котлы и корпуса нескольких судов. С 1935—1939 гг. на базе применения толстопокрывых электродов, электродных стержней из легированных сталей и других сплавов сварка широко внедрялась во всех отраслях промышленности. 1939 год характеризуется началом внедрения автоматической и полуавтоматической сварки под слоем флюса, разработанной под руководством Героя Социалистического труда академика АН УССР Евгения Оскаровича Патона (1870—1953) в руководимом им Институте электросварки.

Сварка под флюсом за счет увеличения мощности сварочной дуги и надежной защиты зоны сварки от окружающего воздуха позволяет значительно (в 5—10 раз) повысить производительность процесса, обеспечить хорошее качество сварного соединения, улучшить условия труда, повысить экономию материалов и средств. Сварка под слоем флюса позволила механизировать и усовершенствовать технологию производства металлоконструкций, судов, барабанов, котлов, турбин, сварных резервуаров, машин и механизмов. Особенно эффективным для таких отраслей промышленности, как котлостроение, турбостроение и других, оказалось применение электрошлаковой сварки, разработанной в начале пятидесятых годов Институтом электросварки им. Е. О. Патона под руководством акад. Б. Е. Патона и д-ра техн. наук Г. З. Волошкевича и отмеченной Ленинской премией. Разработка этого вида сварки позволила механизировать сварку вертикальных швов практически неограниченной толщины. Это также позволило заменить литые и кованные детали сварными (рис. 1). На основе электрошлакового процесса создан новый способ получения металлов и сплавов с особыми свойствами, получивший название электрошлакового переплава.

С 1948 г. получили промышленное применение способы дуговой сварки в инертных защитных газах: ручная неплавящимся электродом, полуавтоматическая и автоматическая неплавящимся и плавящимся электродом.

В 1950—1952 гг. в ЦНИИТмаше была разработана сварка низкоуглеродистых и низколегированных сталей в среде углекислого газа — процесса высокопроизводи-

тельного и обеспечивающего хорошее качество сварных соединений. За разработку этого способа сварки группе советских ученых во главе с д-ром техн. наук проф. К. Ф. Любавским была присуждена Ленинская премия.

Полуавтоматическая и автоматическая сварка в среде углекислого газа стала широко применяться в СССР и за рубежом. Возникла возможность дальнейшей механизации процесса сварки во всех пространственных положениях.

В настоящее время сварка в среде углекислого газа составляет более 25 % объема всех сварочных работ в нашей стране.

Для соединения тугоплавких, химически активных металлов и сплавов и ряда специальных сталей в конце пятидесятих годов французскими учеными был создан новый вид электрической сварки плавлением, получивший название электронно-лучевой сварки. Этот способ

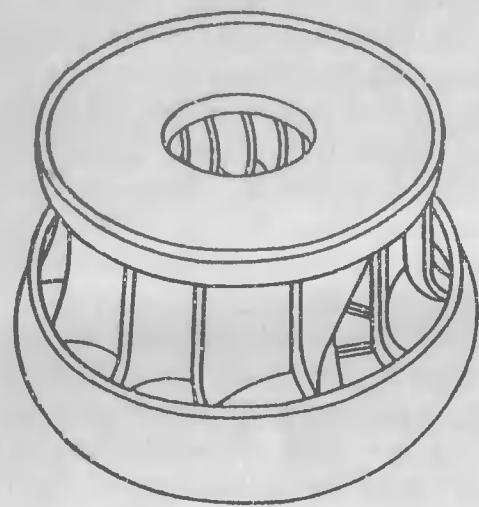


Рис. 1. Лито-сварная конструкция рабочего колеса гидротурбины Красноярской ГЭС

сварки применяется и в нашей промышленности.

Большие заслуги в деле развития и совершенствования теории и практики сварочного производства имеют коллективы Института электросварки им. Е. О. Патона, ВНИИЭСО, ЦНИИТмаша, ЛПИ им. Калинина, МВТУ им. Баумана, Института металлургии им. Байкова АН СССР, объединения Кировский завод, заводов: «Электрик», Балтийского, Уралмаша и др.

Преимущество сварных конструкций в настоящее время не вызывает сомнений. Применение сварки дает не только экономию металла (на 20—25 % по сравнению с клепкой и до 50 % по сравнению с литьем), времени и рабочей силы, уменьшение расходов на оборудование цехов по изготовлению металлоконструкций, улучшение условий труда, но и позволяет решить ряд сложных технических задач по созданию принципиально новых конструкций. Например, только благодаря применению сварки стало возможным изготовление очень экономичных шаровых емкостей для химической промышленности, уникальных

гидравлических и паровых турбин, при изготовлении которых применяются детали и узлы сложных форм, больших толщин из различных легированных сталей; двухслойных металлов (биметалл), представляющих собой малоуглеродистую или низколегированную сталь толщиной выше 6 мм, покрытую тонким слоем высоколегированной стали или алюминий-магниевого сплавом. Это позволяет получить большую экономию дорогостоящих и дефицитных материалов. Двухслойные материалы широко используются в аппаратуре химической, нефтеперерабатывающей и других отраслях промышленности.

ГЛАВА I. КЛАССИФИКАЦИЯ ОСНОВНЫХ ВИДОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ

§ 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ

Электрическую сварку плавлением в зависимости от характера источников нагрева и расплавления свариваемых кромок можно разделить на следующие основные виды сварки (схема 1):

1) электрическая дуговая, где источником тепла является электрическая дуга;

2) электрошлаковая сварка, где основным источником теплоты является расплавленный шлак, через который протекает электрический ток;

3) электронно-лучевая, при которой нагрев и расплавление кромок соединяемых деталей производятся направленным потоком электронов, излучаемых раскаленным катодом;

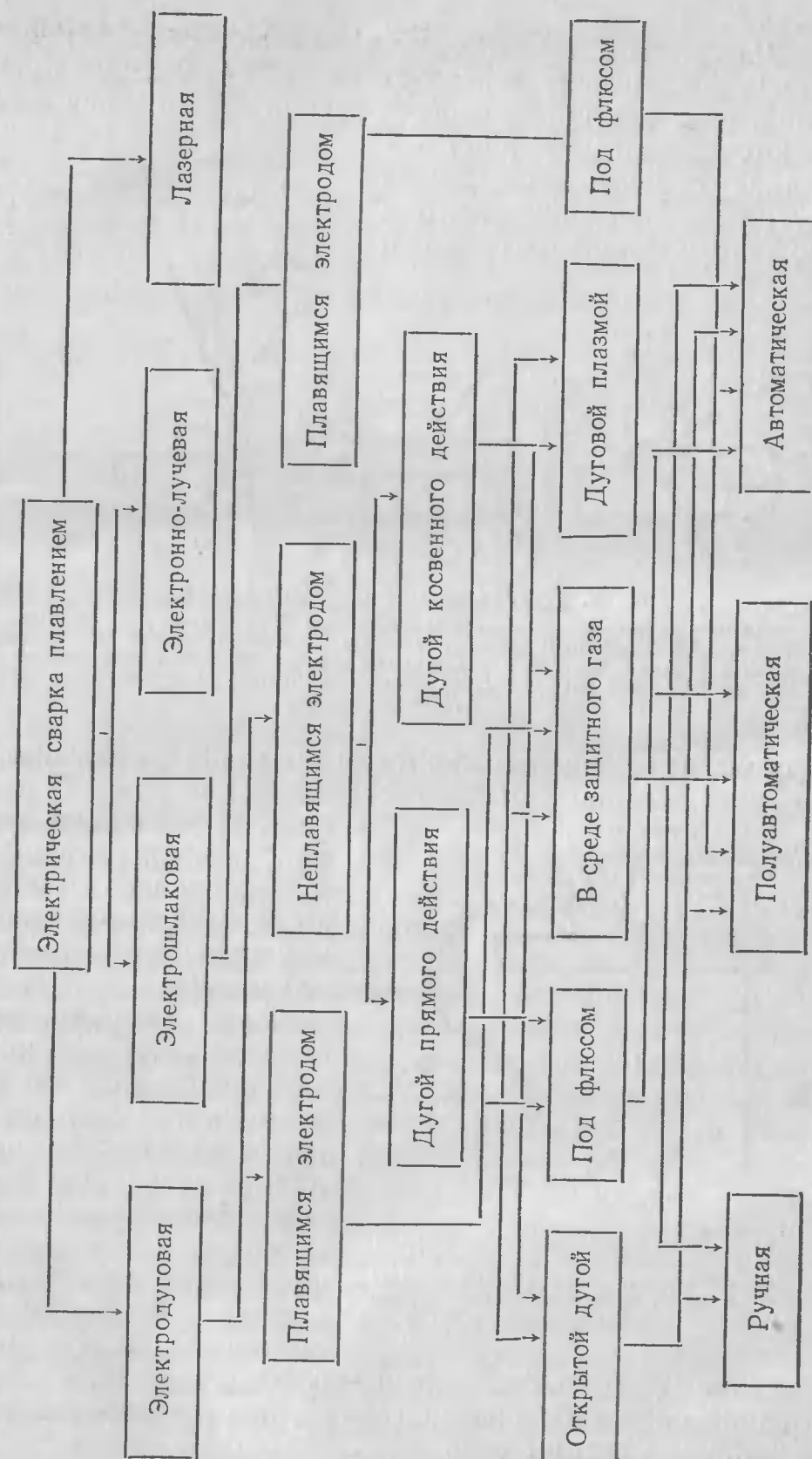
4) лазерная, при которой нагрев и расплавление кромок соединяемых деталей происходят направленным сфокусированным мощным световым лучом микрочастиц — фотонов.

При электрической дуговой сварке основная часть теплоты, необходимая для нагрева и плавления металла, получается за счет дугового разряда, возникающего между свариваемым металлом и электродом. Под действием теплоты дуги кромки свариваемых деталей и торец плавящегося электрода расплавляются, образуя сварочную ванну, которая некоторое время находится в расплавленном состоянии. При затвердевании металла образуется сварное соединение. Энергия, необходимая для образования и поддержания дугового разряда, получается от источников питания дуги постоянного или переменного тока.

Классификация дуговой сварки производится в зависимости от степени механизации процесса сварки, рода тока и полярности, типа дуги, свойств электрода, вида защиты зоны сварки от атмосферного воздуха и др.

Схема 1

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ



По степени механизации различают сварку ручную, полуавтоматическую, автоматическую. Отнесение процессов к тому или иному способу зависит от того, как выполняются зажигание и поддержание определенной длины дуги, манипуляция электродом для придания шву нужной

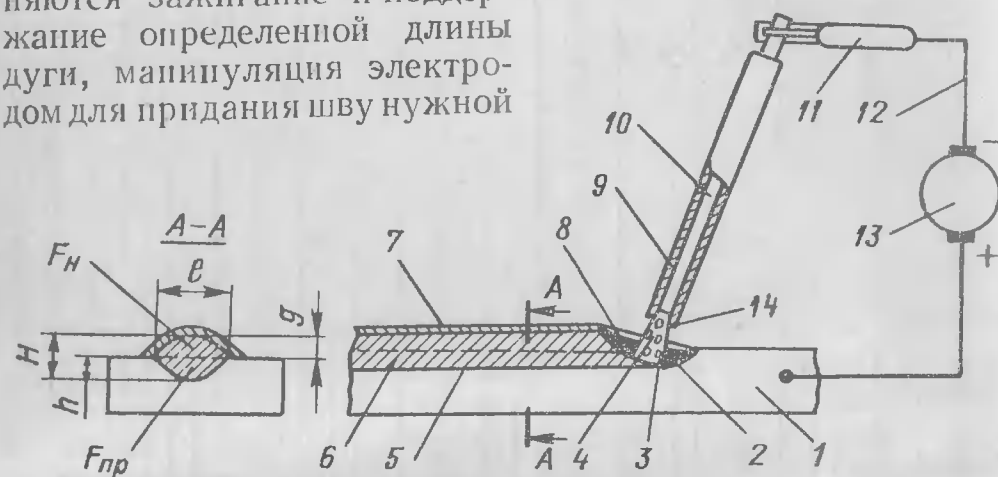


Рис. 2. Ручная сварка покрытым электродом:

1 — основной металл; 2 — сварочная ванна; 3 — кратер; 4 — сварочная дуга; 5 — проплавленный металл; 6 — наплавленный металл; 7 — шлаковая корка; 8 — жидкий шлак; 9 — покрытие электрода; 10 — стержень электрода; 11 — электрододержатель; 12 — сварочная цепь; 13 — источник питания; 14 — чехольчик

формы, перемещение электрода по линии наложения шва и прекращение процесса сварки. При ручной сварке (рис. 2) указанные операции, необходимые для образования шва, выполняются рабочим-сварщиком вручную без применения механизмов.

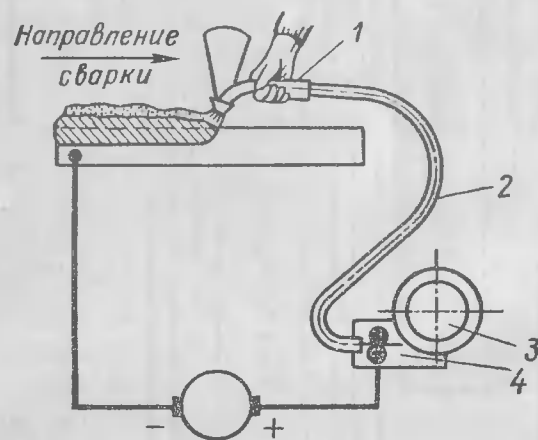


Рис. 3. Полуавтоматическая сварка:

1 — держатель; 2 — гибкий шланг; 3 — катушка с проволокой; 4 — подающий механизм

При автоматической сварке под флюсом (рис. 4) механизмируются операции по возбуждению дуги, поддержанию определенной длины дуги, перемещению дуги по линии наложения шва.

Автоматическая сварка плавящимся электродом ведется сварочной проволокой диаметром 1—6 мм; при этом режим сварки (ток, напряжение, скорость перемещения дуги и др.) более стабилен, что обеспечивает однородность качества шва по его длине, в то же время требуется большая точность в подготовке и сборке деталей под сварку.

По роду тока различают дуги, питаемые постоянным током прямой (минус на электроде) или обратной (плюс на электроде) полярности или переменным током. В зави-

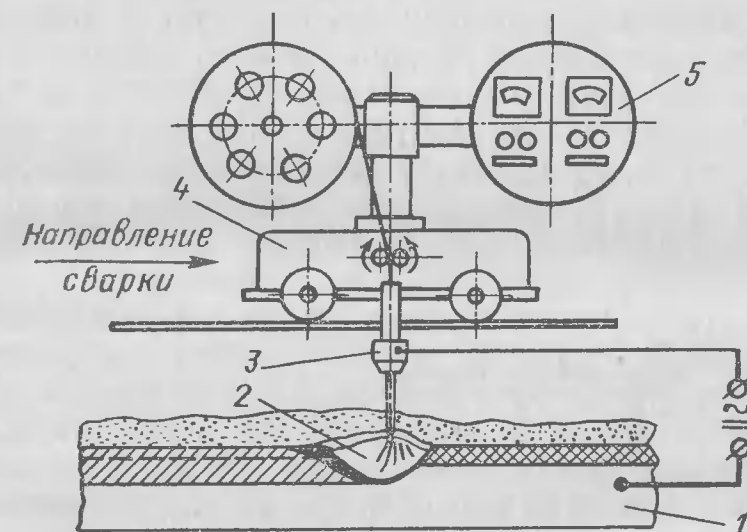


Рис. 4. Автоматическая дуговая сварка под флюсом:

1 — основной металл; 2 — сварочная ванна; 3 — сварочная головка; 4 — тележка; 5 — пульт управления

симости от способов сварки применяют ту или иную полярность. Сварка под флюсом и в среде защитных газов обычно производится на обратной полярности.

По типу дуги различают дугу прямого действия (зависимую дугу) и дугу косвенного действия (независимую дугу). В первом случае дуга горит между электродом и основным металлом, который также является частью сварочной цепи, и для сварки используется теплота, выделяемая в столбе дуги и на электродах; во втором — дуга горит между двумя электродами. Основной металл не является частью сварочной цепи и расплавляется преимущественно за счет теплоотдачи от газов столба дуги.

В этом случае питание дуги осуществляется обычно переменным током, но она имеет незначительное применение из-за малого коэффициента полезного действия дуги (отношение полезно используемой тепловой мощности дуги к полной тепловой мощности).

По свойствам электрода различают способы сварки плавящимся электродом и неплавящимся (угольным, графитовым или вольфрамовым).

Сварка плавящимся электродом является самым распространенным способом сварки; при этом дуга горит между основным металлом и металлическим стержнем, подаваемым в зону сварки по мере плавления. Этот вид сварки можно производить одним или несколькими электродами. Если два электрода подсоединены к одному полюсу источника питания дуги, то такой метод называют двухэлектродной сваркой, а если больше — многоэлектродной сваркой пучком электродов.

Если каждый из электродов получает независимое питание — сварку называют двухдуговой (многодуговой сваркой). При дуговой сварке плавлением коэффициент полезного действия дуги достигает 0,7—0,9.

По условиям наблюдения за процессом горения дуги различают открытую, закрытую и полуоткрытую дугу.

При открытой дуге визуальное наблюдение за процессом горения дуги производится через специальные защитные стекла — светофильтры. Открытая дуга применяется при многих способах сварки: при ручной сварке металлическим и угольным электродом и сварке в защитных газах.

Закрытая дуга располагается полностью в расплавленном флюсе—шлаке, основном металле и под гранулированным флюсом, и она невидима.

Полуоткрытая дуга характерна тем, что одна ее часть находится в основном металле и расплавленном флюсе, а другая над ним. Наблюдение за процессом производится через светофильтры. Используется при автоматической сварке алюминия по флюсу (см. рис. 155).

По роду защиты зоны сварки от окружающего воздуха различают следующие способы сварки: без защиты (голым электродом, электродом со стабилизирующим покрытием), со шлаковой защитой (толстопокрытыми электродами, под флюсом), шлакогазовой (толстопокрытыми электродами), газовой защитой (в среде газов) с комбинированной защитой (газовая среда и покрытие или флюс).

Стабилизирующие покрытия представляют собой материалы, содержащие элементы, легко ионизирующие сварочную дугу. Наносятся они тонким слоем на стержни

электродов (тонкопокрытые электроды), предназначенных для ручной дуговой сварки.

Защитные покрытия представляют собой механическую смесь различных материалов, предназначенных ограждать расплавленный металл от воздействия воздуха, стабилизировать горение дуги, легировать и рафинировать металл шва.

Наибольшее применение имеют средне- и толстопокрытые электроды, предназначенные для ручной дуговой сварки и наплавки и изготавливаемые в специальных цехах или заводах.

Применяются также магнитные покрытия, которые наносятся на проволоку в процессе сварки за счет электромагнитных сил, возникающих между находящейся под током электродной проволокой и ферромагнитным порошком, находящимся в бункере, через который проходит электродная проволока при полуавтоматической или автоматической сварке.

Иногда это еще сопровождается дополнительной подачей защитного газа (рис. 5).

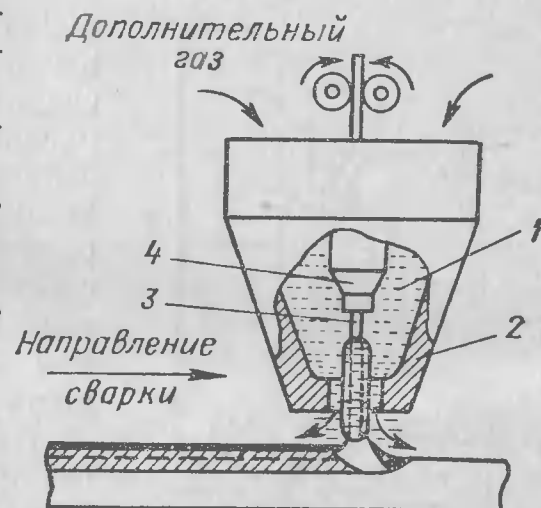


Рис. 5. Автоматическая сварка ферромагнитным порошком:

1 — ферромагнитный порошок; 2 — наконечник; 3 — сварочная проволока; 4 — мундштук

§ 2. СУЩНОСТЬ ОСНОВНЫХ СПОСОБОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ

Сварка покрытыми электродами производится плавящимся электродом с покрытием (см. рис. 2) или неплавящимся электродом без защиты и с газовой защитой. Под действием теплоты сварочной дуги плавится основной металл, а в случае применения плавящихся электродов — и электроды с покрытием. После кристаллизации расплавленного металла образуется шов.

При сварке под флюсом (см. рис. 4) сварочная проволока и гранулированный флюс подаются в зону дуги,

горящей в полости, заполненной парами металла и материалов флюса.

Под воздействием теплоты сварочной дуги плавятся кромки основного металла, электродная проволока и часть флюса. По мере перемещения дуги расплавленный флюс всплывает на поверхность сварочной ванны, остывает, образуя легко отделяющуюся от шва шлаковую

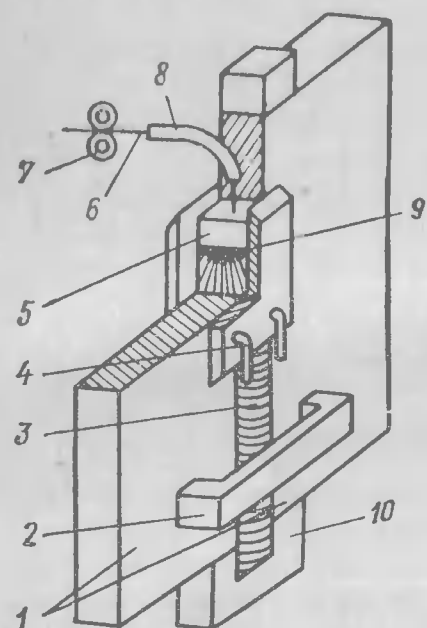


Рис. 6. Электрошлаковая сварка проволочным электродом

свариваемых деталей и с принудительным формированием металла шва (рис. 6).

Подлежащие сварке детали 1 собираются на скобах 2 с зазором 20—30 мм. Чтобы предотвратить вытекание жидкого металла и шлака из плавильного пространства и обеспечить нормальное формирование шва 3, по обе стороны зазора стыка прижимаются охлаждаемые водой медные ползуны или пластины 4.

Шлаковая ванна 5 образуется за счет расплавленного флюса, занимающего пространство между кромками соединяемых деталей и формирующими устройствами. Образование шлаковой ванны обычно осуществляется дуговым процессом. Возбуждаемая в начальный период сварки дуга между электродной проволокой и дном «кармана» 10, после расплавления некоторого количества флюса шунтируется расплавленным электропроводным шлаком и гаснет.

корку, а металл сварочной ванны кристаллизуется в форме сварного шва. Шлак защищает расплавленный металл от воздействия кислорода и азота воздуха, легирует и замедляет охлаждение металла шва, что способствует получению качественного наплавленного металла при высокой производительности.

При электрошлаковой сварке основная часть теплоты, необходимая для нагрева и плавления основного и электродного металла, поступает за счет прохождения электрического тока через расплавленный флюс — шлак. Сварка этим способом осуществляется обычно при вертикальном расположении

Дуговой процесс заменяется шлаковым. Электродная проволока 6 подается в плавильное пространство роликами 7 механизма подачи с заданной скоростью. К электроду ток подводится при помощи мундштука 8. Электрический ток, проходящий между электродной проволокой и основным металлом через шлаковую ванну, нагревает расплав и поддерживает в нем температуру выше температуры плавления основного металла и электрода. За счет этого шлак расплавляет электродную проволоку и кромки

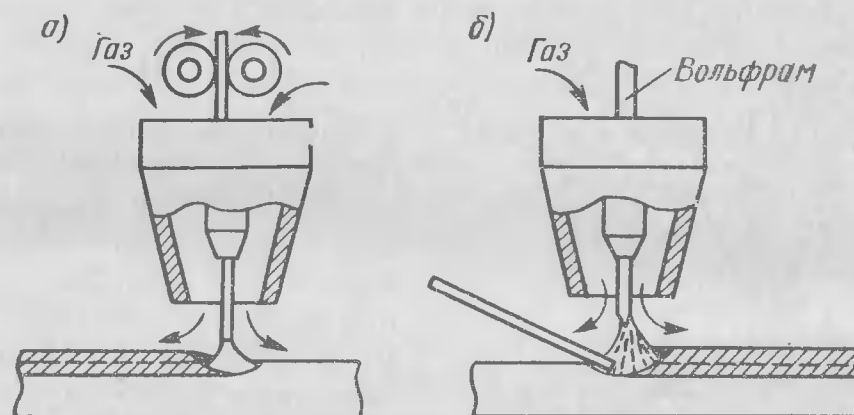


Рис. 7. Сварка в среде защитных газов плавящимся (а), неплавящимся (б) электродом

свариваемых деталей. Расплавленный металл стекает на дно шлаковой ванны, образуя металлическую (сварочную) ванну 9. Вследствие отвода теплоты в основной металл и медные ползуны металл ванны охлаждается и в нижней части кристаллизуется в сварной шов, соединяющий кромки свариваемых деталей.

Механизм для подачи электродной проволоки и формирующие ползуны соединены с подвижной частью тележки электрошлаковой установки и по мере выполнения шва перемещаются вверх со скоростью сварки.

С помощью электрошлаковой сварки за один проход можно сваривать металл толщиной от 12 мм и более, и это наиболее производительный процесс из всех существующих способов сварки плавлением.

При сварке в среде защитных газов (газоэлектрическая сварка, рис. 7) защитной средой служат инертные газы (аргон, гелий), активные газы (углекислый газ, водород, азот) и смеси газов (аргона с гелием, аргона с кислородом, углекислого газа с кислородом и др.). Газ предназначен оттеснить кислород и азот воздуха от расплавленного металла, а при сварке активных металлов — и от нагретых

до высоких температур участков основного металла. К газозлектрической сварке также относится атомно-водородная сварка.

При атомно-водородной сварке расплавление металла происходит за счет теплоты электрической дуги косвенного действия, горячей между двумя неплавящимися вольфрамовыми электродами, укрепленными в специальной горелке, позволяющей подавать водород в зону горения дуги (рис. 8). Под действием теплоты дуги водород диссоциирует по реакции

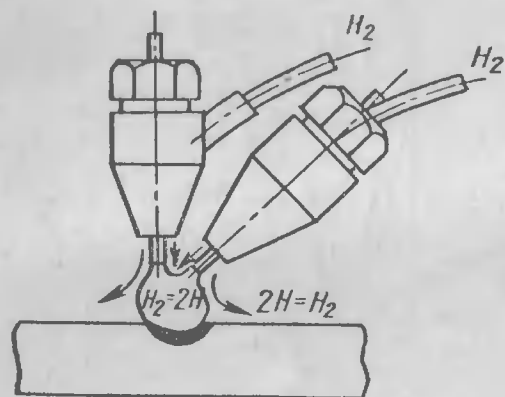


Рис. 8. Атомно-водородная сварка

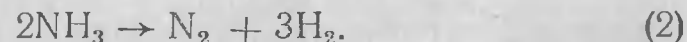


и частично ионизируется. Атомарный водород, соприкасаясь со свариваемым металлом, объединяется в молекулы, выделяя теплоту, расходуемую на диссоциацию. Некоторое количество теплоты также выделяется за счет сгорания углерода и комбинации.

При увеличении расстояния между электродами и объема подаваемого водорода дуга приобретает веерообразную форму и издает звенящий звук; напряжение возрастает до 70—150 В; такую дугу называют «звенящей».

Для питания дуги применяют переменный ток от специальных трансформаторов с напряжением холостого хода 250—300 В, позволяющих регулировать сварочный ток в пределах 20—100 А, что требует уделять особое внимание вопросам создания безопасных условий работы.

Для атомно-водородной сварки применяют вольфрамовые электроды диаметром 1—4 мм, водород по ГОСТ 3022—80 или диссоциированный аммиак, который при нагревании до температуры 350—600 °С в присутствии катализатора диссоциирует по уравнению



Наличие азота в газе, поступающем в горелку, не ухудшает качество металла шва, так как в присутствии водорода нитриды разлагаются.

Сварка трехфазной дугой применяется при ручном и механизированных способах сварки. Сущность этого спо-

соба (рис. 9) состоит в том, что к двум электродам 1, 2, закрепленным в специальном устройстве, конструкция которого зависит от способа сварки, и к свариваемому изделию 4 подводится переменный ток от трехфазного источника питания. После возбуждения горит не одна дуга, как обычно, а одновременно три однофазные дуги: по одной между каждым из электродов и изделием (дуги 3 и 5) и дуга 6 между обоими электродами. Эта дуга по отношению к свариваемому изделию является независимой и может гореть отдельно между двумя электродами.

Сварка трехфазной дугой характеризуется высокой стабильностью процесса, так как угасание дуг происходит попеременно в определенной последовательности. В связи с этим дуговой промежуток всегда поддерживается в ионизированном состоянии.

Разновидностью дуговой сварки неплавящимся электродом в защитном газе является способ сварки сжатой дугой. При этом способе сварки неплавящимся вольфрамовым электродом используется свойство столба дуги при искусственном сжатии повышать свою температуру и устойчивость.

Сварку малых толщин производят сжатой дугой, возникающей между вольфрамовым электродом и охлаждаемым медным наконечником с подачей аргона для защиты вольфрамового электрода и вытеснения столба дуги из наконечника (рис. 10, а). Такая сжатая дуга имеет температуру до 16 000 °С, в то время как сжатая дуга прямого действия (рис. 10, б) может иметь температуру до 30 000—50 000 °С. Благодаря высокой температуре сжатой дуги можно значительно увеличить скорость сварки, которая при обычной аргонодуговой сварке мала; при этом значительно уменьшается расход аргона по сравнению с обычной аргонодуговой сваркой и возможна ручная, автоматическая и полуавтоматическая сварка.

Сварка в камерах с контролируемой атмосферой (рис. 11) применяется для соединения легко окисляющихся металлов и их сплавов. В такой камере имеется возможность создания атмосферы из инертных газов, что обеспе-

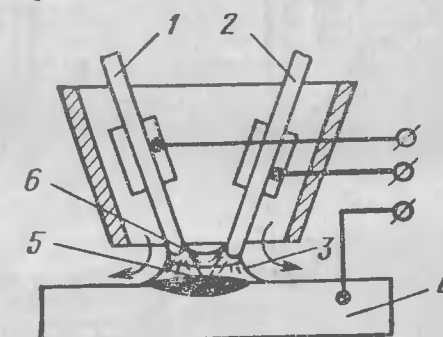


Рис. 9. Сварка трехфазной дугой

чивает высокие механические свойства сварного соединения.

Подготовка камеры к сварке заключается в следующем: свариваемые изделия устанавливают в камере, куда также загружают электроды и присадочную проволоку. После чего загрузочные люки и отверстия для перчаток герметизируют, и в камере с помощью вакуумных насосов создается вакуум до 13 мПа. Для предохранения резиновых перчаток от разрыва воздух откачивают с наружной

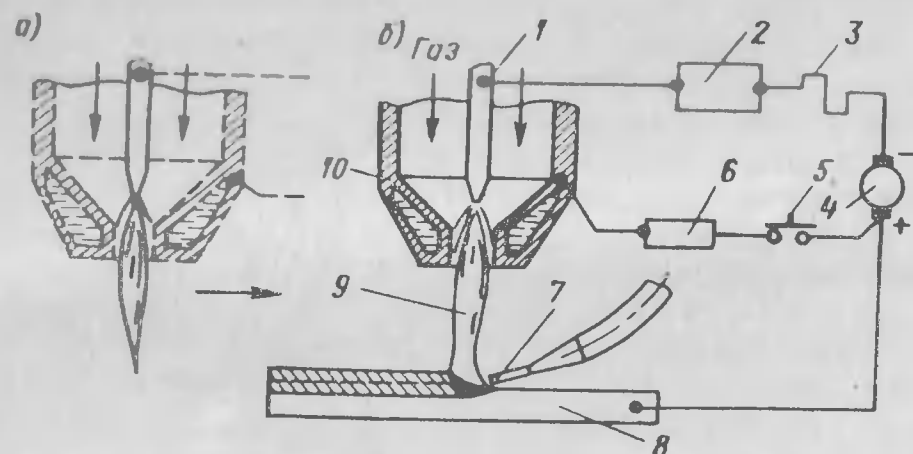


Рис. 10. Сварка сжатой дугой косвенного (а) и прямого (б) действия с подачей присадочной проволоки:

1 — вольфрамовый электрод; 2 — балластное сопротивление рабочей дуги; 3 — катушка токового реле; 4 — источник питания дуги; 5 — контакты токового реле; 6 — балластное сопротивление дежурной дуги; 7 — присадочная проволока; 8 — основной металл; 9 — сжатая дуга; 10 — наконечник

стороны люков, перекрывающих отверстие с перчатками. После откачки камеру заполняют инертным газом до атмосферного давления.

Сварку в камере производят на тех же режимах, что и при сварке в инертных газах на воздухе. Пластичность металла сварного соединения приближается к пластичности основного металла.

Автоматическая дуговая сварка в камерах с контролируемой атмосферой обеспечивает более стабильное качество сварных соединений.

При электронно-лучевой сварке в вакууме энергия, необходимая для нагрева и плавления металла, получается в результате интенсивной бомбардировки места сварки быстро движущимися в вакууме электронами.

Вакуум порядка $13 \cdot 10^{-3}$ — $13 \cdot 10^{-5}$ Па, создаваемый в сварочной камере, подобной приведенной на рис. 11, необходим для того, чтобы резко уменьшить расход энер-

гии электронов на ионизацию и удалить из зоны сварки газы, имеющие большое сродство к свариваемым металлам. Схема формирования пучка электронов при электронно-лучевой сварке приведена на рис. 12. Через загрузочный люк свариваемые детали помещаются на сварочный стол в вакуумной камере, из которой непрерывно откачиваются газы.

Вольфрамовый или металлокерамический катод 1, размещенный внутри фокусирующей головки 2, при пропускании через него переменного тока низкого напряжения излучает мощный поток электронов. Проходя че-

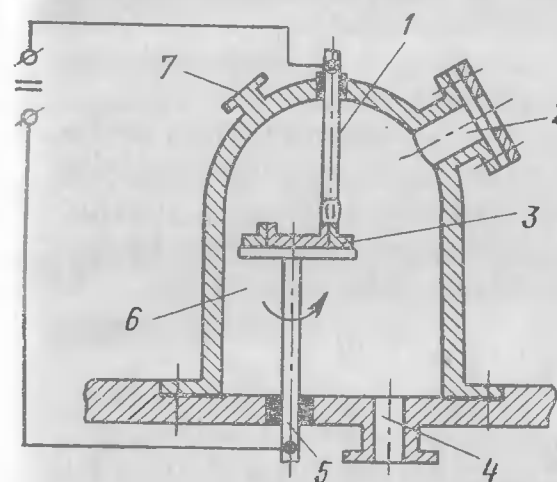


Рис. 11. Сварка в контролируемой атмосфере:

1 — электрод; 2 — смотровое окно; 3 — свариваемое изделие; 4 — патрубок для присоединения насоса; 5 — ось поворотного стола; 6 — камера; 7 — канал для подачи защитного газа

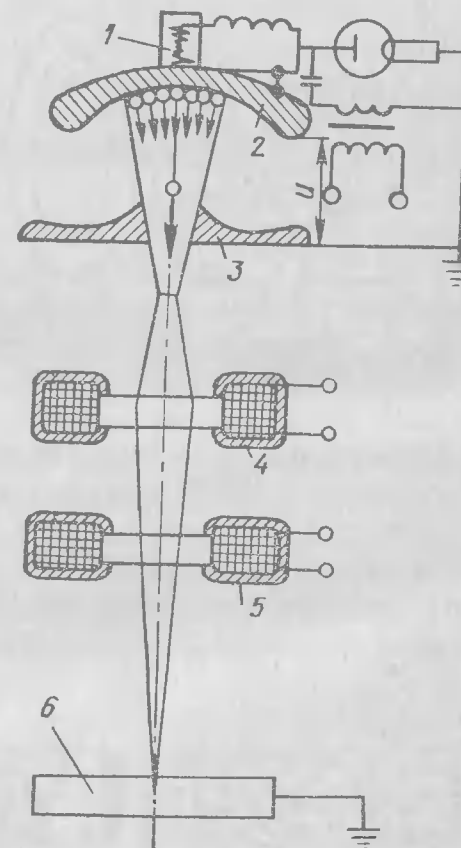


Рис. 12. Схема формирования пучка электронов при электронно-лучевой сварке

рез анод 3, магнитную линзу 4 и отклоняющую магнитную систему 5, он фокусируется в узкий луч электронов и направляется на место сварки деталей 6. Для ускорения движения электронов к катоду и аноду подводится выпрямленный ток напряжением 30—100 кВ.

При ударе электронов о поверхность деталей большая часть их кинетической энергии переходит в тепловую, и на узком участке металл плавится, образуя шов после кристаллизации. Наблюдение за процессом сварки ведется

через смотровое окно. Электронно-лучевая сварка применяется при изготовлении деталей из тугоплавких химически активных металлов.

Наряду с электронно-лучевой сваркой применяется лазерная сварка. Термин «лазер» получил свое название по первым буквам английской фразы (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation — laser),

которая в переводе означает: усиление света посредством стимулированного излучения. Эта сварка основана на использовании светового излучения, являющегося следствием взаимодействия фотонов (микрочастиц световой природы) с атомами системы.

В твердотельном рубиновом лазере применяется

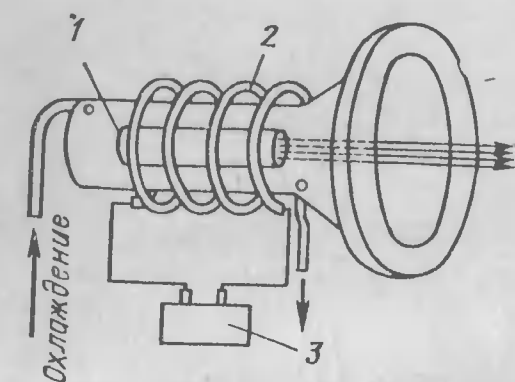


Рис. 13. Принципиальная схема лазера с твердым рубиновым излучателем

искусственный рубин. Он представляет собой стержень, состоящий из корунда Al_2O_3 с примесью хромпика Cr_2O_3 . Схема действия рубинового лазера приведена на рис. 13.

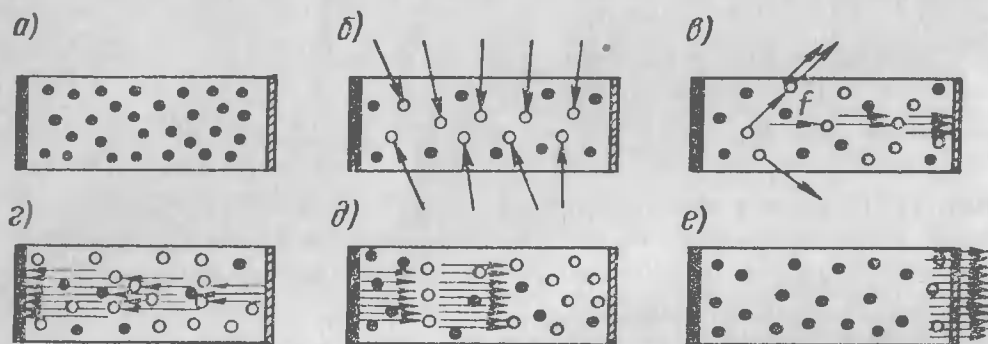


Рис. 14. Схема лавинообразного нарастания потока фотонов в кристалле рубина под влиянием внешнего возбуждения

Здесь рубиновый кристалл 1 расположен в кварцевой трубке 2, которая представляет собой газоразрядную лампу, наполненную ксеноном. Эта лампа, называемая лампой накачки, благодаря разрядам высоковольтного конденсатора 3 дает импульсные вспышки света определенной частоты и нужной энергии, которые и обеспечивают поток фотонов внутри рубинового кристалла.

Фотоны, проникая внутрь вещества, возбуждают его атомы. Этот процесс схематически показан на рис. 14.

На рис. 14, а показан рубиновый стержень, в котором атомы не возбуждены и их электроны находятся на основных уровнях. Невозбужденные атомы изображены черными точками. Рубиновый стержень показан с одним зачерненным торцом и другим заштрихованным. Это сделано потому, что в действительности торцы рубинового стержня строго параллельны, посеребрены, но так что один из торцов (зачерненный) отражает все лучи, а второй (заштрихованный) пропускает световой поток при его достаточной интенсивности.

На рис. 14, б стрелками показано, как фотоны лампы накачки проникают в рубиновый кристалл и как некоторые невозбужденные до этого атомы хрома (черные точки) превращаются в возбужденные до различных уровней атомы (кружочки). Так в рубиновом стержне получается огромное количество атомов хрома различной степени возбуждения. Однако все они в таком состоянии могут просуществовать лишь миллиардные доли секунды, так как их электроны стремятся перейти на более низкий уровень возбуждения. Этот переход происходит без лучеиспускания. Вся энергия перехода превращается в тепловую энергию внутри кристалла, поэтому он должен в процессе работы охлаждаться.

Самое главное происходит тогда, когда множество электронов возбужденных атомов накапливается и задерживается на определенном уровне (на промежуточной орбите). Хотя эта задержка, как уже говорилось, оказывается всего только в несколько тысячных долей секунды, но именно это свойство задержки и накопления большого количества электронов в одинаковом состоянии возбуждения является одним из решающих.

Как только возбужденных атомов будет больше половины, достаточно одного внешнего стимулирующего (синхронного) фотона, чтобы вызвать лавинный процесс «перехода» электронов всех возбужденных атомов с уровня задержки на основной. Именно так и происходит в рубине. Последний синхронный фотон f (рис. 14, в) вызывает лавину стимулированных фотонов (происходит излучение — испускание квантов энергии атомами, обозначенными стрелками). Лавина фотонов мгновенно умножается за счет зеркальных поверхностей торцов рубина. Умножение происходит вследствие того, что на своем

пути фотоны, ударяясь о возбужденные атомы, заставляют их испускать дополнительный поток фотонов.

Составляя еще недостаточно интенсивное излучение, фотоны отражаются от правого торца со слабым посеребрением. Отразившись от него (рис. 14, *г*), они уже в огромной степени умноженные, бьются о зеркало левого торца и, отразившись от него, еще более умноженные, прорываются через правое зеркало, образуя наружный тонкий пучок красного света (рис. 14, *д* и *е*). Тут же вслед за выходом пучка фотонов из кристалла все электроны атомов рубина до следующего импульса возвращаются на основные уровни, и атомы становятся нейтральными (черные точки, рис. 14, *е*). Таким образом, лазер не только генерирует световой пучок, но и усиливает его интенсивность. Выходной луч является узконаправленным и очень мощным.

Коэффициент полезного действия рубиновых лазеров невелик и составляет 0,1 %; разработаны лазеры с более высоким КПД.

ГЛАВА II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ

§ 3. СВАРОЧНАЯ ДУГА И СУЩНОСТЬ ПРОТЕКАЮЩИХ В НЕЙ ПРОЦЕССОВ

Состояние вещества характеризуется взаимодействием молекул и атомов. Различие свойств твердого, жидкого и газообразного состояния определяется различием средних расстояний между молекулами.

В твердом и жидком состоянии они очень малы, чем и объясняется малая сжимаемость этих веществ и общее их название «конденсированное состояние». В газах это расстояние велико, поэтому они могут сравнительно легко сжиматься под действием внешнего давления. Этим же объясняется различие в электропроводности конденсированного состояния и газов.

В конденсированных веществах крайние электроны легко теряют связь с ядрами своих атомов и свободно перемещаются по веществу. Такие свободные электроны, называемые электронами проводимости, и являются носи-

телями тока в проводнике. В газах электроны притягиваются только к своим ядрам, поэтому при обычных условиях газы ток не проводят.

В электрической дуге (плазме) газ ионизирован, благодаря чему он, сохраняя способность сжиматься, приобретает электропроводность вещества, находящегося в конденсированном состоянии. Это и есть четвертое агрегатное состояние вещества — плазма. В целом же плазма электрически нейтральна, так как сумма зарядов в любой части объема равна нулю.

Сварочной дугой называют длительный разряд электрического тока в газовой среде между находящимися под напряжением твердыми или жидкими проводниками (электродами), который является концентрированным источником теплоты, используемым для плавления металла при сварке (см. рис. 16).

Электрические заряды в сварочной дуге переносятся электрически заряженными частицами — электронами, а также положительно и отрицательно заряженными ионами.

Электроном называется материальная частица, обладающая отрицательным зарядом электричества. Масса электрона очень мала и составляет $9,1 \cdot 10^{-28}$ г.

Положительным ионом называют атом или молекулу, потерявшие один электрон (однократная ионизация) или несколько электронов (многократная ионизация). *Отрицательным ионом* называют материальную частицу, присоединившую к себе избыточный электрон. Наименьшей массой обладает ион (протон) водорода $1,67 \cdot 10^{-24}$ г. Следовательно, масса электрона в 1840 раз меньше массы протона водорода.

Процесс, при котором в газе образуются положительные и отрицательные ионы, называется *ионизацией*, а такой газ ионизированным.

Положительные ионы могут образоваться из атомов всех элементов, отрицательные — не всех. Легче всего отрицательные ионы образуют так называемые электроотрицательные элементы — галоиды: (F, Cl, Br, J), кислород и др., обладающие значительным сродством к электрону. Этот фактор существенно влияет на условия горения сварочной дуги, но недостаточно изучен.

При изучении процессов ионизации за единицу энергии, сообщенной частице, принимается электронвольт (эВ). Эта единица численно равна энергии, которую получает

электрон, проходя через электрическое поле с разностью потенциалов в 1 В

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.} \quad (3)$$

В зависимости от количества энергии, сообщенной электрону в атоме или молекуле, они могут возбудиться или ионизироваться. Приняты следующие названия характеристик этих процессов: потенциал возбуждения, потенциал ионизации, работа выхода и сродство к электрону.

Потенциал возбуждения $U_{\text{в}}$ характеризует энергию, которую необходимо затратить для перемещения электрона атома элемента, находящегося в газообразном состоянии, на орбиту с более высоким энергетическим уровнем. Возбужденное состояние частицы неустойчиво, и электроны мгновенно возвращаются на стационарную орбиту, а энергия возбуждения выделяется в окружающее пространство в виде электромагнитного излучения. Атом или молекула возвращается в нейтральное состояние.

Потенциал ионизации $U_{\text{и}}$ характеризует энергию, которую необходимо затратить для отрыва электрона от атома элемента, находящегося в газообразном состоянии, с превращением его в положительный ион.

Потенциал возбуждения и потенциал ионизации зависят от строения атома и от энергетического уровня, с которого удаляется электрон.

Работа выхода $\varphi_{\text{э}}$ равна энергии, необходимой для выделения электрона с поверхности твердого или жидкого проводника и удаления его из сферы действия сил электростатического притяжения.

Работа выхода электрона обратно пропорциональна межатомарному расстоянию, и по этой причине у щелочных и щелочноземельных металлов работа выхода электрона меньше, чем у других элементов. Работа выхода также зависит от свойств, чистоты и температуры поверхности электрода (катода). Окисление поверхности или нанесение на нее другого металла при определенных условиях снижает работу выхода электрона. Например, введение в состав вольфрамового электрода окиси тория ThO_2 или лантана La_2O_3 значительно увеличивает эмиссию (испускание) электронов с поверхности катода. Так, эмиссия с катода вольфрамового электрода, содержащего 0,5 % ThO_2 , увеличивается в тысячи раз.

Т а б л и ц а 1. Значения потенциала возбуждения, потенциала ионизации, работы выхода и сродства к электрону некоторых элементов

Параметр	Cs	K	Na	Al	Ca	Ti	Fe
$U_{\text{в}}$, В	—	1,6	2,1	—	1,9	3,3	4,7
$U_{\text{и}}$, В	3,8	4,3	5,1	5,9	6,1	6,8	7,8
$\varphi_{\text{э}}$, эВ	—	2,2	2,3	4,2	2,9	3,9	4,1
$U_{\text{с}}$, В	—	—	0,7	0,6	—	—	—

Параметр	C	O	H	N	Ar	F	He
$U_{\text{в}}$, В	—	7,9	10,2	6,3	11,6	11,6	19,7
$U_{\text{и}}$, В	11,2	13,2	13,5	14,5	15,7	18,6	24,5
$\varphi_{\text{э}}$, эВ	4,3	—	—	—	—	—	—
$U_{\text{с}}$, В	1,1	3,8	0,7	0,6	—	3,9	0,37

Сродство к электрону $U_{\text{с}}$ характеризует энергию, которая выделяется при присоединении электрона к атому или положительно заряженному иону. Наибольшее сродство к электрону имеют фтор, кислород, хлор; наличие этих элементов в дуговом промежутке сказывается на условии горения дуги.

Значения потенциалов возбуждения и ионизации, работы выхода, сродства к электрону некоторых элементов приведены в табл. 1.

Эмиссию электронов с катода и ионизацию в дуговом промежутке вызывает ряд факторов. Так, в частности, выделение электронов с поверхности катода достигается за счет термоэлектронной эмиссии, автоэлектронной и эмиссии в результате ударов тяжелых ионов по катоду.

Термоэлектронная эмиссия заключается в способности раскаленной поверхности электрода (катода) испускать электроны. Необходимая для этого энергия получается за счет изменения при высоких температурах собственной энергии электронов проводимости материала. В результате создаются условия, при которых электроны способны оторваться от поверхности электрода и покинуть его пределы. При этом будет затрачена энергия, равная работе выхода.

Электроны, ушедшие из металла в результате эмиссии, пополняются из внешнего источника тока, служащего для питания дуги. Чем выше температура катода, тем

больше плотность тока термоэлектронной эмиссии и тем больше электронов будет обладать энергией, необходимой для выхода электронов из катода.

Для плавящихся электродов термоэлектронная эмиссия не играет основной роли в ионизации дугового промежутка вследствие низкой температуры их кипения и малой плотности тока. При термоэлектронной эмиссии наблюдается охлаждение электрода, являющегося катодом, за счет уноса электронами значительной энергии.

Автоэлектронная эмиссия характеризуется тем, что энергия, необходимая для вырыва электронов с поверхности катода, сообщается внешним электрическим полем, создаваемым источником питания. Внешнее электрическое поле облегчает выход электронов; оно как бы вытягивает электроны за пределы действия силы притяжения электрона оставшимся в металле положительным зарядом, поэтому при той же температуре увеличивается плотность тока эмиссии.

Автоэлектронная эмиссия возможна даже при низкой температуре катода. При сварке электродами с низкой температурой кипения автоэлектронная эмиссия является, вероятно, одной из основных причин эмиссии электронов.

Эмиссия электронов в результате ударов ионов по катоду возникает в тех случаях, когда положительные ионы под действием электрического поля устремляются к катоду и передают им энергию, достаточную для выбивания электронов. Этот вид эмиссии играет значительную роль в создании мощного потока электронов в сварочной дуге, и благодаря выделению на катоде потенциальной и кинетической энергии ионов увеличивается скорость плавления электрода.

Изучив основные условия эмиссии электронов, рассмотрим основные виды ионизации в газах.

На условия стабильного горения сварочной дуги наряду с процессами, связанными с эмиссией электронов, существенное влияние оказывают процессы возникновения заряженных частиц в объеме нейтрального газа — *объемная ионизация*.

Различают три вида ионизации в газах: соударением, облучением (фотоионизация), нагревом (термическая ионизация).

Ионизация соударением заключается в том, что электроны, движущиеся с большой скоростью, встречаясь с нейтральными атомами газа, ударяются о них, выби-

вают электроны, ионизируют атомы. Такие соударения называют неупругими соударениями в отличие от упругих, вызывающих только повышение температуры газа. Количество энергии, которое необходимо затратить для отрыва электрона от ядра, называют работой ионизации eU . Если работа ионизации eU измеряется в электронвольтах, а потенциал ионизации $U_{\text{и}}$ — в вольтах, то их численные значения равны. Кинетическую энергию для ионизации электроны приобретают под действием сил электрического поля, и скорость их движения пропорциональна разности потенциалов поля на участке пути их пробега без соударения.

Зная, что на основании закона сохранения энергии приращение кинетической энергии электрона $mv^2/2$ должно равняться работе, затраченной на перемещение электрона, можно написать следующее уравнение:

$$mv^2/2 = eU, \quad (4)$$

где m — масса электрона ($9,1 \cdot 10^{-31}$), кг; v — скорость электрона, м/с; e — заряд электрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$), Кл; U — разность потенциалов на участке пути, пройденном электроном, В.

Из уравнения (4) определим скорость электрона

$$v = \sqrt{2 \frac{e}{m} U}. \quad (5)$$

Подставляя в это выражение значения e и m , получим $v = 6 \cdot 10^5 \sqrt{U}$ м/с или $v = 600 \sqrt{U}$ км/с. Пользуясь этой формулой, можно подсчитать необходимую скорость для осуществления ионизации соударением.

Пример. Требуется определить, какую скорость должны приобретать электроны, чтобы за счет соударения осуществить ионизацию атомов железа, калия, азота: $v_{\text{Fe}} = 600 \sqrt{7,8} = 1680$ км/с; $v_{\text{K}} = 600 \sqrt{4,3} = 1254$ км/с; $v_{\text{N}} = 600 \sqrt{14,5} = 2280$ км/с.

Ионизация облучением — процесс образования заряженных частиц за счет поглощения газом световых квантов. Для ионизации облучением требуется, чтобы энергия световых квантов была равна или больше энергии, необходимой для ионизации газа. Видимый свет не может ионизировать газы.

Ультрафиолетовые лучи спектра вызывают ионизацию паров щелочных и щелочно-земельных металлов. Кванты

рентгеновских и гамма-лучей способны ионизировать все без исключения газы.

Ионизация нагревом (термическая ионизация) протекает при высоких температурах за счет неупругих столкновений частиц газа, имеющих большую кинетическую энергию. Термическую ионизацию может вызвать столкновение нейтральных частиц, а также столкновение нейтральных частиц с заряженными.

В газе, подвергнутом высоким температурам, даже при отсутствии каких бы то ни было ускоряющих потенциалов или воздействий облучения извне, возникают возбужденные и ионизированные атомы. Термическая ионизация практически заметна уже при температуре 1750 °С, поэтому соприкосновение нейтральных атомов с каплями перегретого расплавленного металла приводит к повышению кинетической энергии хаотического движения атомов, а следовательно, к усилению ионизации.

Для осуществления термической ионизации всех частиц газа, заключенных в рассматриваемом объеме, требуется определенный нагрев, что при сварке может иметь место только тогда, когда столб дуги заполнен газом с низким потенциалом ионизации. Обычно в нагретом газе уравниваются процессы возникновения заряженных частиц и их исчезновение, и в объеме газа при данной температуре устанавливается постоянная степень ионизации.

Степень ионизации газа характеризует отношение числа образовавшихся заряженных частиц к общему количеству нейтральных и заряженных частиц. Степень термической ионизации однородного газа может быть определена по графику, который построен расчетным путем (рис. 15). Из графика видно, что с повышением температуры степень ионизации возрастает, асимптотически приближаясь к единице, так как наряду с ионизацией имеет место рекомбинация.

Рекомбинацией называется процесс образования нейтральных частиц из ионов разных знаков или из положительных ионов и электронов.

По кривым, приведенным на рис. 15, видно, что чем ниже потенциал ионизации вещества, тем больше степень его ионизации при данной температуре. Так, при температуре 6000 К степень ионизации паров калия составляет около 0,4, а для паров железа степень ионизации

очень мала. Уменьшение степени ионизации приводит к уменьшению проводимости дугового промежутка.

В реальных условиях сварки плавящимся электродом дуговой промежуток заполнен не одним газом, а смесью газов. Ионизация каждого из газов, входящих в смесь, будет протекать не так, как однородного газа, поэтому вводится понятие об эффективном потенциале ионизации $U_{и.эф.}$.

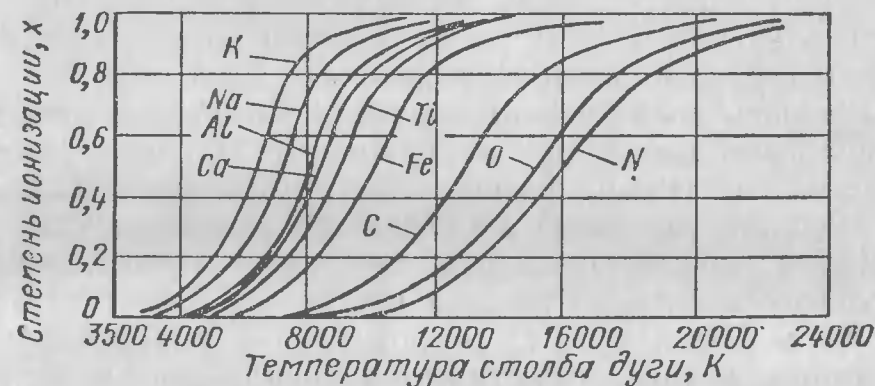


Рис. 15. Зависимость степени ионизации от температуры для различных веществ

Под *эффективным потенциалом ионизации газовой смеси* подразумевают потенциал ионизации газа (условно однородного), который давал бы при заданной температуре ту же степень ионизации, что и смесь газов заданного состава. Результаты расчета эффективного потенциала ионизации в газовой смеси паров калия и железа при $T = 5800$ К следующие:

Содержание атомов K, % ($U_{и} = 4,3$ эВ)	0	1	2	5
Содержание атомов Fe, % ($U_{и} = 7,8$ эВ)	100	99	98	95
Эффективный потенциал ионизации $U_{и.эф.}$ В	7,83	6,35	6,08	5,46
Содержание атомов K, % ($U_{и} = 4,3$ эВ)	10	20	50	100
Содержание атомов Fe, % ($U_{и} = 7,8$ эВ)	90	80	50	0
Эффективный потенциал ионизации $U_{и.эф.}$ В	5,28	5,05	4,61	4,3

Из приведенных данных следует, что при введении в атмосферу дуги уже сравнительно небольшой массы вещества с низким потенциалом ионизации эффективный потенциал ионизации газовой смеси значительно снижается

по сравнению с потенциалом ионизации газов, входящих в смесь, что обеспечивает устойчивое горение дуги. На этом эффекте основано введение в покрытия и флюсы стабилизирующих веществ с низким потенциалом ионизации.

§ 4. ПРОЦЕССЫ НА ОТДЕЛЬНЫХ УЧАСТКАХ СВАРОЧНОЙ ДУГИ

Процесс зажигания дуги при сварке плавящимся электродом начинается с короткого замыкания электрода с основным металлом.

Из-за шероховатости поверхности электродов касание при коротком замыкании происходит отдельными выступающими участками, которые под действием выделяющейся теплоты мгновенно расплавляются, образуя жидкую перемычку между основным металлом и электродом. При отводе электрода жидкая перемычка растягивается, сечение ее уменьшается, сопротивление и температура возрастают. В момент достижения расплавленным металлом перемычки температуры кипения в легко ионизирующихся парах металла возникает дуга. Процесс возникновения и развития дуги длится доли секунды. При сварке неплавящимся электродом происходят те же процессы, но жидкая перемычка образуется за счет плавления только основного металла. Очень часто зажигание дуги осуществляется без замыкания электродов: за счет повышенного напряжения между ними. В этом случае применяются осцилляторы, являющиеся источником вспомогательного тока высокого напряжения и частоты.

В силу различной природы физических явлений в катодной, анодной области и столбе дуги дуговой промежуток обычно разделяют на область, примыкающую к катоду, называемую катодной, примыкающую к аноду — анодной областью, а промежуток между ними — столбом дуги (рис. 16). На поверхности катода и анода образуются катодные и анодные активные пятна, через которые проходит весь ток сварочной дуги и поэтому они наиболее нагреты. Высокая температура катодного пятна является непременным условием существования дугового разряда.

Рассмотрим основные физические процессы, протекающие на участках дуги.

В катодной области из катодного пятна происходит эмиссия электронов, которые, ускоряясь электрическим полем в области катодного падения напряжения, по-

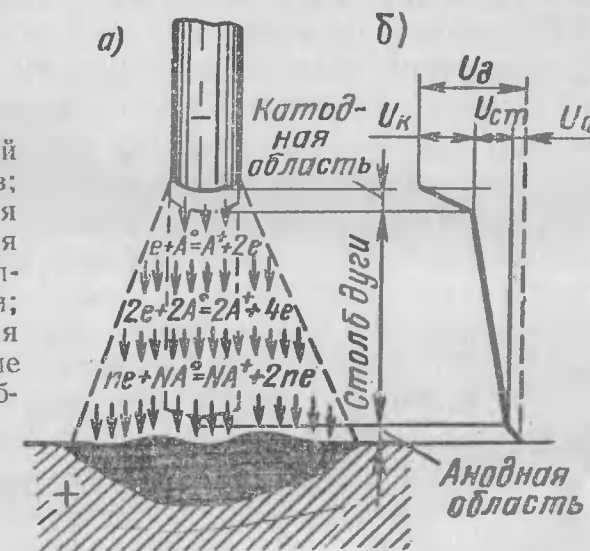
дают в столб дуги. Сталкиваясь в столбе дуги с нейтральными частицами, электроны их ионизируют



в результате получаются два медленных электрона и положительный ион.

Положительные ионы, обладая положительным зарядом, движутся к катодному пятну. Если предположить, что каждый эмиттированный катодным пятном электрон ионизирует однократно нейтральную частицу, то коли-

Рис. 16. Схема сварочной дуги: а — перенос зарядов; б — падение напряжения (U_d — падение напряжения на дуге; U_k — падение напряжения в катодной области; $U_{ст}$ — падение напряжения в столбе дуги; U_a — падение напряжения в анодной области)



чество ионов будет равно количеству электронов. Но из-за большой массы ионов скорость их движения в катодной области будет меньше, чем электронов, и в каждый данный момент времени положительный заряд всех ионов будет больше отрицательного заряда электронов. В области катодного падения напряжения создается избыточный объемный положительный заряд, возникновение которого в прикатодной области и создает в ней повышенную напряженность электрического поля. В катодной области на длине около 10^{-5} см сосредоточена значительная часть напряжения дуги, называемая катодным падением напряжения U_k .

В анодной области около анодного пятна на участке, равном длине свободного пробега электрона, наблюдается резкое падение напряжения, так называемое анодное падение напряжения U_a , вызванное наличием большого некомпенсированного объемного отрицательного заряда. Это имеет место вследствие того, что электроны, возник-

шие в столбе дуги на расстоянии от анода, равном или меньшем длины их свободного пробега в направлении электрического поля, направляются непосредственно на анод. На этом участке дуги почти отсутствует ионизация и нет положительных ионов, заряд которых мог бы компенсировать заряд электронов. Поэтому электроны, проходя анодную область, резко увеличивают скорость своего движения и, попадая на анодное пятно, тормозятся и нейтрализуются. При торможении электронов выделяется вся приобретенная ими в области анодного падения напряжения кинетическая энергия, а нейтрализация сопровождается выделением энергии, равной работе выхода.

В результате выделения электронами энергии температура электрода в анодном пятне близка к температуре кипения материала анода.

Столб дуги (плазма) — область, расположенная между катодным и анодным падением напряжения. Атмосфера столба дуги представляет собой смесь электронов, положительных ионов (в некоторых случаях отрицательных ионов), а также нейтральных атомов.

Столб дуги в целом не имеет заряда. Он нейтрален. В каждом данном сечении столба дуги одновременно находятся равные количества заряженных частиц противоположных знаков.

Установлено, что градиент падения напряжения в столбе дуги постоянен, и при дуговой сварке электродами из низкоуглеродистой стали колеблется в пределах 20—40 В/см. Падение напряжения в столбе дуги пропорционально его длине:

$$U_d = U_k + U_a + U_{ст}; \quad (7)$$

$$U_d = a + bl, \quad (8)$$

где a — сумма падения напряжения в прикатодной и прианодной области; b — падение напряжения на единицу столба дуги, В/мм; l — длина столба дуги, мм.

Энергия, необходимая для поддержания постоянства дугового промежутка, поступает от источника питания дуги.

Температура столба дуги зависит от эффективного потенциала ионизации газов, заполняющих дуговой промежуток, напряженности поля, плотности тока в электроде, полярности и др. При равном токе и напряженности поля температура изменяется пропорционально изменению эффективного потенциала ионизации. Для прибли-

женных подсчетов температуры дугового промежутка в зависимости только от эффективного потенциала ионизации можно пользоваться уравнением Хренова

$$T_{ст} = 810 U_{и.эф}. \quad (9)$$

Здесь $T_{ст}$ — температура столба дуги, К; $U_{и.эф}$ — эффективный потенциал ионизации, В.

Температура столба дуги по его сечению неодинакова. Наибольшую температуру имеет центральная часть столба дуги. Увеличение плотности тока приводит к увеличению температуры столба дуги. Так, при сварке под флюсом переменным током 450 А при диаметре электрода 5 мм температура столба дуги составляет 6000 К, а при диаметре электрода 2 мм — 7800 К.

§ 5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И УСЛОВИЯ УСТОЙЧИВОГО ГОРЕНИЯ СВАРОЧНОЙ ДУГИ

Сварочная дуга должна иметь определенные технологические свойства, обеспечивающие быстрое ее зажигание, устойчивое горение, малую чувствительность к изменению ее длины в определенных пределах, быстрое ее повторное зажигание после погашения, нужное проплавление основного металла и др. Все это создает условия получения качественного сварного соединения.

Влияние на технологические свойства дуги некоторых факторов рассматривались ранее, поэтому ознакомимся с влиянием тока, напряжения, рода тока, состава газа, характера переноса металла в дуге.

Влияние соотношения между током и напряжением

Для нормального протекания процесса электрической сварки плавлением ток и напряжение на дуге должны находиться в определенной зависимости друг от друга.

Зависимость между установившимися значениями тока и напряжением дуги при постоянной ее длине называется статической (вольт-амперной) характеристикой дуги и при сварке под флюсом может быть представлена кривой (рис. 17), по которой видно, что напряжение дуги с увеличением сварочного тока сначала круто снижается, потом почти не меняется, а затем опять возрастает. Это

имеет место вследствие того, что с увеличением тока законы изменения активных пятен, поперечного сечения, плотности тока и электропроводности столба дуги различны, что приводит к изменению сопротивления, и как следствие, — к определенному изменению напряжения в столбе дуги с изменением тока.

На первом участке кривой по абсциссе до тока 60—80 А статическая характеристика дуги $U_d = f(I_d)$, будет падающей, т. е. напряжение на дуге уменьшается с увеличением тока. Объясняется это тем, что при маломощных

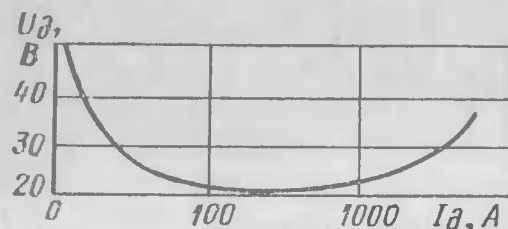


Рис. 17. Статическая характеристика дуги; $U_d = f(I_d)$ при постоянной длине дуги

дугах сумма катодного и анодного падения напряжения не зависит от тока. Падение напряжения в столбе дуги уменьшается с увеличением тока, так как площадь сечения и электропроводность увеличиваются, а плотность тока в столбе дуги уменьшается.

На втором участке кривой в пределах тока 80—800 А напряжение на дуге не зависит от тока. Это объясняется тем, что при данных значениях тока площадь сечения столба дуги, катодных и анодных пятен увеличивается пропорционально току, поэтому плотность тока и падение напряжения на всех участках дуги сохраняются постоянными и статическая характеристика для этого случая жесткая. Дуга с такой характеристикой находит широкое применение в сварочной технике.

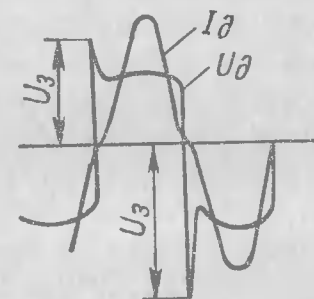
На третьем участке кривой при токах выше 800 А увеличение тока приводит к увеличению напряжения дуги, т. е. форма статической характеристики становится возрастающей. Это есть результат того, что при большой плотности тока, когда катодное пятно занимает всю поверхность торца электрода, интенсивность увеличения площади сечения столба дуги с возрастанием тока уменьшается, сопротивление столба дуги будет расти незначительно, а градиент потенциала и падение напряжения в столбе дуги будут расти с увеличением сварочного тока. Дуга с возрастающей статической характеристикой используется при сварке под флюсом и в защитных газах.

Из рассмотренного следует, что статическая характеристика дуги $U_d = f(I_d)$ для диапазона изменений сварочного тока в реальных условиях сварки имеет —образную форму, т. е. переходит из падающей в жесткую и, наконец, при больших значениях тока становится возрастающей.

Влияние рода тока

Все ранее рассмотренное по условиям горения дуги относилось к случаю питания ее от источников постоянного тока. Но при питании дуги от источников

Рис. 18. Кривые изменения тока и напряжения дуги во времени при сварке переменным током: I_d — ток в дуге; U_d — напряжение дуги; U_3 — напряжение повторного зажигания дуги



переменного тока электрические и тепловые процессы несколько отличаются от процессов, происходящих в дуге постоянного тока. При переходе значения тока через ноль и перемене полярности в начале и в конце каждого полупериода дуга угасает и температура активных пятен и дугового промежутка снижается (рис. 18). Это вызывает деионизацию газовой смеси и уменьшение электропроводности столба дуги. Особенно интенсивно падает температура активного пятна, расположенного на поверхности сварочной ванны, в связи с интенсивным отводом теплоты в массу основного металла.

В следующий за угасанием дуги момент напряжение на дуговом промежутке меняет полярность, и создавшиеся в прошедшем полупериоде объемные разряды у катода и анода под действием электрического поля нового направления устремляются друг к другу и рекомбинируют, что вызывает дополнительную деионизацию газов в столбе дуги.

Понижение температуры столба дуги, активных пятен и процессы рекомбинации резко снижают степень ионизации дугового промежутка, и повторное зажигание дуги в начале каждого полупериода обычно происходит только при повышенном напряжении между электродами, называемым пиком зажигания, или напряжением повторного

зажигания дуги, которое всегда выше напряжения дуги, соответствующего стационарному ее горению. Установлено, что пик зажигания несколько выше в тех случаях, когда катодное пятно находится на основном металле (в связи с относительно большим отводом теплоты).

Наличие в дуге паров элементов с низким потенциалом ионизации снижает эффективный потенциал ионизации газа в дуге, в результате чего в каждом полупериоде тока после угасания дуги электропроводность дуги сохраняется более продолжительное время (до более низких температур), пик зажигания становится меньше, дуга возбуждается легче и горит устойчивее. На этом основано применение стабилизирующих элементов, особенно при сварке на переменном токе.

Введение же в дуговой промежуток элементов, имеющих большое сродство к электрону, — F, Cl, O (см. табл. 1) и образующих отрицательные ионы, приводит к увеличению рекомбинации, деионизации газов и повышению пика зажигания дуги.

Чем хуже условия для повторного возбуждения дуги, тем выше должен быть пик зажигания, тем выше должно быть напряжение холостого хода источника питания дуги.

Влияние состава газа на условия горения дуги

Для защиты расплавленного металла в зону горения дуги часто специально вводят газы (табл. 2). Рассмотрим, как они будут влиять на условия горения дуги при аргонодуговой сварке и сварке в среде углекислого газа.

Т а б л и ц а 2. Физические свойства некоторых газов

Газ	Относительная атомная или относительная молекулярная масса	Масса одного литра, г	Температура сжижения, °C
Аргон	39,94	1,78	—185,5
Гелий	4,00	0,17	—268,9
Водород	1,00	0,09	—253
Азот	14,00	1,25	—196
Кислород	15,99	1,43	—183
Углекислый газ	44,00	1,96	—56

Введение газа приводит к охлаждению катода и столба дуги, что является причиной относительно ускоренного прекращения эмиссии электронов с катода и падения проводимости межэлектродного промежутка после угасания дуги, вследствие чего повторное зажигание дуги в каждом полупериоде тока еще больше затрудняется. Но различные газы по-разному влияют на условия зажигания и горения дуги переменного тока. Рассмотрим влияние некоторых из них.

Инертные газы. Аргон, а особенно гелий, имеют высокий потенциал возбуждения и потенциал ионизации,

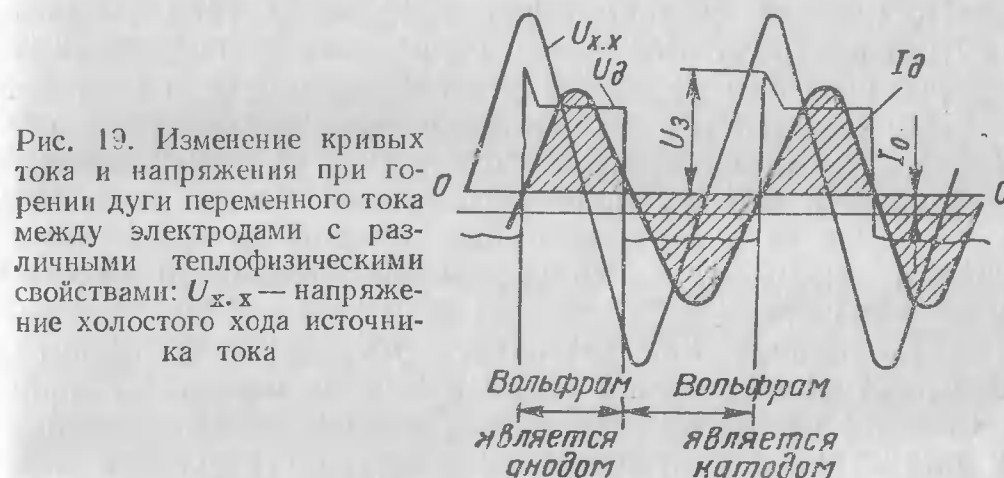


Рис. 19. Изменение кривых тока и напряжения при горении дуги переменного тока между электродами с различными теплофизическими свойствами: $U_{х.х}$ — напряжение холостого хода источника тока

поэтому зажигание дуги затруднено. Но, возникнув, дуга горит устойчиво вследствие того, что отсутствуют потери энергии на диссоциацию, имеющую место при многоатомных газах. Кроме того, атомы инертных газов имеют целиком заполненные электронами внешние орбиты, хорошо защищающие приближающийся к атому лишний электрон от действия положительного заряда ядра, что исключает образование отрицательных ионов и снижает коэффициент рекомбинации, повышая устойчивость дуги.

При горении дуги между электродами с разными теплофизическими свойствами, например между вольфрамом и алюминием, в те полупериоды, когда катодом является вольфрам, дуговой разряд проходит в основном за счет термоэлектронной эмиссии. Благодаря высокой температуре кипения и относительно низкой теплопроводности вольфрама напряжение зажигания невелико, и дуга горит при меньшем напряжении (рис. 19). В те полупериоды, когда катодом является алюминий (обратная

полярность), напряжение зажигания дуги относительно велико. Зажигание дуги в обоих случаях происходит с некоторым опозданием, и кривая напряжения дуги имеет несимметричную форму; в ней имеется постоянная составляющая, которая вызывает появление в сварочной цепи постоянной составляющей тока, значение которой тем больше, чем больше разница в теплофизических свойствах материала электрода и изделия. Если при указанных условиях сварки в цепь дуги включить амперметр постоянного тока, то отклонение стрелки его будет пропорционально составляющей постоянного тока.

Постоянная составляющая сварочного тока создает постоянное магнитное поле в сердечнике трансформатора и дросселя. Это ухудшает устойчивость дуги и отрицательно сказывается на технологических свойствах ее. Тогда даже незначительное содержание O_2 и N_2 в аргоне приводит к образованию тугоплавкой пленки окислов и нитридов на поверхности алюминиевого сплава в месте сварки, препятствующей сплавлению кромок и формированию шва.

Для полного или частичного устранения составляющей постоянного тока в сварочную цепь последовательно включают следующие элементы: конденсаторы, активное и индуктивное сопротивление и другие устройства.

Сварочная дуга, горящая между вольфрамовым электродом и изделием в инертных газах, обладает способностью к катодному распылению, заключающемуся в том, что под действием положительных ионов, бомбардирующих катод (изделие), с поверхности сварочной ванны и соседних относительно холодных зон происходит вырывание (испарение) частиц металла. Вместе с ними удаляются окисные пленки, даже такие тугоплавкие как Al_2O_3 , что улучшает условия сварки.

В среде аргона наблюдается более интенсивное катодное распыление, чем в среде гелия.

Углекислый газ. Под действием теплоты сварочной дуги углекислый газ CO_2 диссоциирует на окись углерода и атомарный кислород, и атмосфера дуги насыщается кислородом, имеющим большой потенциал ионизации и большое сродство к электрону (см. табл. 1). Вследствие большого сродства к электрону атомы кислорода захватывают электроны, образуя отрицательные ионы, которые, соединяясь с положительными ионами, рекомбинируют.

Захват электронов атомами кислорода и нейтрализация положительных ионов приводят к уменьшению общего количества заряженных частиц в дуговом промежутке, а уменьшение количества положительных ионов уменьшает положительный объемный заряд у катода, и электроны не получают должного ускорения в катодной области.

Электроны, обладающие меньшей кинетической энергией, легче захватываются атомами кислорода и положительными ионами, и в результате степень ионизации резко падает. При питании дуги переменным током это еще усугубляется и тем, что часть отрицательных ионов, накапливаясь у анода, увеличивает объемно-отрицательный заряд у анода, и в момент смены полярности, когда объемные заряды у катода и анода устремляются друг к другу, рекомбинируют. В связи с этим деионизация газов в столбе дуги, в котором находятся атомы кислорода, будет больше, чем в дуге переменного тока, в которой отсутствуют элементы, имеющие большое сродство к электрону. Поэтому переменный ток для сварки в углекислом газе почти не применяется, а применяется постоянный ток преимущественно обратной полярности.

§ 6. ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАСС НА СВАРОЧНУЮ ДУГУ

Устойчивость сварочной дуги и возможность направления ее в определенное место при сварке постоянным током зависят от направления действия результирующего магнитного поля вокруг дуги, которая часто вызывает отклонение от нормального положения. Такое явление называют *магнитным дутьем*.

Причина возникновения магнитного дутья заключается в следующем: столб сварочной дуги представляет собой гибкий проводник, который под воздействием магнитного поля, как и обычный проводник с током, может выталкиваться с места, где магнитные силовые линии более сгущены, в направлении, где силовые линии менее сгущены.

Рассмотрим влияние на сварочную дугу постоянного тока различных магнитных полей и ферромагнитных масс.

Влияние собственного магнитного поля

Под собственным магнитным полем принято понимать круговое магнитное поле тока, возникающее при прохождении тока по элементам сварочной цепи, в том числе и по основному металлу. В этом случае, если токоподвод подключен к свариваемому изделию вблизи дуги, магнитное поле оказывает равномерное симметричное воздействие на столб дуги, и дуга не отклоняется (рис. 20, а). Если же токоподвод подключен вдали от места горения дуги, то за счет усиления (сгущения) магнитного поля со стороны токоподвода дуга отклоняется в противоположную сторону (рис. 20, б).

Сила, отклоняющая дугу, пропорциональна квадрату тока, вследствие чего магнитное дутье становится очень заметным при сварке на постоянном токе в 300 А и более. Соответствующим переносом места подключения токоподвода к изделию можно уменьшить или устранить

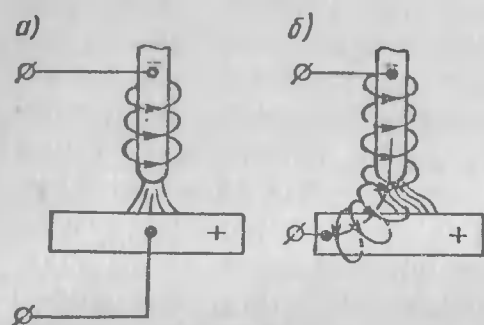


Рис. 20. Действие собственных магнитных полей на дугу

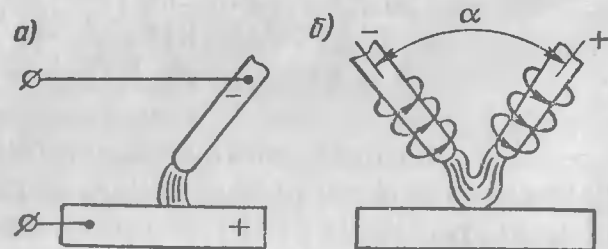


Рис. 21. Влияние наклона электрода на электромагнитное отдувание дуги

отклонение дуги. Отклонение дуги от нормального положения уменьшается при сварке с наклоном электрода в сторону магнитного отдувания дуги (рис. 21, а). Следовательно, небольшим наклоном электрода в сторону, противоположную отдуванию, можно заметно уменьшить магнитное отдувание дуги. Этим широко пользуются на практике.

При сварке дугой косвенного действия регулирование величины магнитного отдувания достигается изменением угла α между электродами (рис. 21, б). Чем меньше угол, тем больше выдувается дуга.

Влияние постороннего магнитного поля

Подковообразным магнитом можно создать поперечное магнитное поле (рис. 22), которое будет взаимодействовать с кольцевым магнитным полем, возникающим вокруг дуги при прохождении тока. В результате такого взаимодействия увеличивается напряженность поля с той стороны дуги, где направление силовых линий совпадает, а со стороны, где силовые линии встречаются, напряженность поля уменьшается. Появляется результирующая электромагнитная сила F , отклоняющая дугу в сторону.

На направление отклонения дуги влияет полярность подключения и направление постороннего магнитного поля. Если постороннее поле достаточно сильное, оно может совсем оборвать дугу. Под действием магнитного поля небольшой напряженности дуга будет отклоняться до тех пор, пока не наступит равновесие действующих на нее сил. Равновесие наступает вследствие того, что с отклонением дуги от нормального положения происходит ее деформация и магнитные поля с обеих сторон дуги уравниваются.

Продольное магнитное поле направлено по оси сварочной дуги и совпадает с направлением электрического поля дуги. Оно может быть получено при размещении дуги в соленоиде (рис. 23, а). Такое магнитное поле не оказывает никакого действия на заряженные частицы, движущиеся в направлении электрического поля, но на заряженные частицы, перемещающиеся поперек этого поля, оно оказывает заметное влияние.

Ранее нами было отмечено, что температура центральной части столба дуги выше периферийной, следовательно, степень ионизации и концентрации заряженных частиц (ионов) в центральной части тоже будет выше. И, как следствие, начнется диффузия частиц с центральной

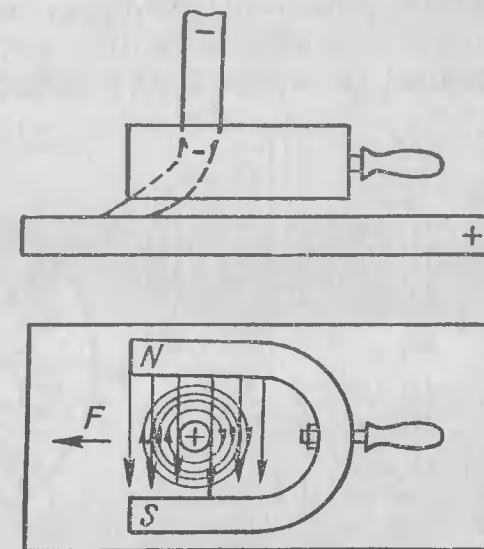


Рис. 22. Действие поперечного магнитного поля на сварочную дугу

части к периферии, т. е. от области большей концентрации к области меньшей концентрации. При движении в радиальном направлении заряженные частицы пересекают магнитное поле, которое, взаимодействуя с ним, создает силу, действующую на частицы в направлении, перпендикулярном к магнитному полю и к направлению их движения вследствие диффузии.

Направление действия сил будет зависеть от направления магнитного поля соленоида, но не от рода и полярности тока. В результате частицы столба дуги будут вращаться по окружности вокруг оси дуги (рис. 23, б).

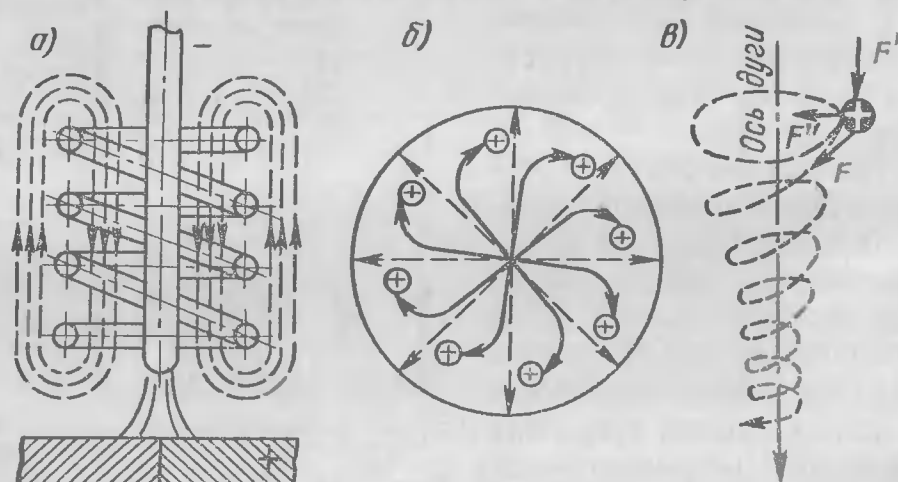


Рис. 23. Действие продольного магнитного поля на дугу

Вращение ионов и электронов происходит (в соответствии с различными знаками зарядов) в разные стороны. При столкновении с нейтральными частицами они увлекают их за собой и приводят во вращение. Ввиду малой массы электроны не оказывают существенного воздействия на нейтральные атомы и молекулы, и весь столб дуги вращается в направлении вращения ионов. Наряду с вращением частиц вокруг оси столба дуги, наблюдается концентрация частиц по оси столба дуги, чему в известной мере способствует и центробежная сила, возникающая при вращении частиц.

Направление вращения можно определить, зная направление продольного магнитного поля. При этом, если смотреть по направлению магнитных силовых линий, столб дуги будет вращаться против часовой стрелки. Но кроме продольного магнитного поля на заряженные частицы действует и продольное электрическое поле, под действием которого частица перемещается по вертикали.

Таким образом, совместное действие продольного магнитного и электрического полей заставляет заряженную частицу двигаться по спирали (рис. 23, в). Возникающая при этом центробежная сила стягивает столб дуги к вертикальной оси. Сечение столба дуги уменьшается, дуга становится более жесткой, а нагрев более концентрированным, технологические свойства дуги улучшаются и этим иногда пользуются на практике.

Действие ферромагнитных масс на отклонение дуги обусловлено тем, что магнитная проницаемость ферромагнитных материалов в тысячи раз больше магнитной

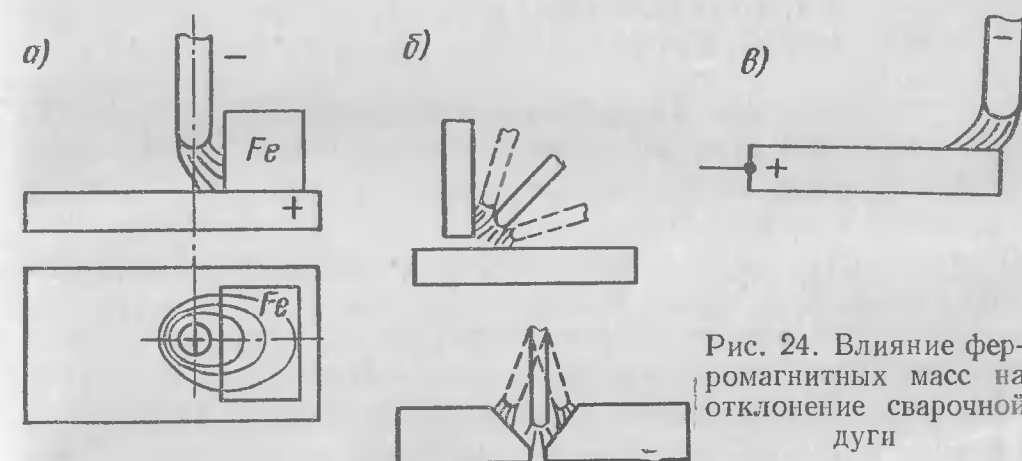


Рис. 24. Влияние ферромагнитных масс на отклонение сварочной дуги

проницаемости воздуха, а нам известно, что магнитные силовые линии стремятся пройти по среде с наименьшим магнитным сопротивлением. Поэтому, если возле дуги находится ферромагнитное тело, концентрическое магнитное поле вокруг дуги исказится вследствие того, что силовые линии, расположенные вблизи ферромагнитного тела, легко пронизывают его, создавая разрежение в этой части магнитного поля, а другая часть силовых линий, расположенных с противоположной стороны дуги, вместе с первой частью будет также подтянута к ферромагнитному телу, и на этой стороне дуги силовые линии магнитного поля сгустятся. Дуга как гибкий проводник окажется прижатой к ферромагнитному телу (рис. 24, а). Это свойство дуги проявляется при сварке соединений впритык и встык (рис. 24, б), когда дуга отклоняется к одной из кромок. Характерно, что влияние на дугу ферромагнитной массы может оказаться более интенсивным, чем влияние собственного магнитного поля дуги. Так, в случае, иллюстрируемом на рис. 24, в, можно

было бы ожидать отклонения дуги с края пластины, но в действительности вследствие влияния ферромагнитной массы пластины дуга будет отклоняться на пластину.

Для уменьшения магнитного отдувания дуги наряду с наклоном электрода в сторону отдувания дуги и перемещением токоподвода можно рекомендовать и временное размещение ферромагнитного материала в начале и конце соединений для создания симметричного магнитного поля или замену постоянного тока переменным, при котором магнитное дутье значительно меньше.

§ 7. ПЕРЕНОС МЕТАЛЛА ЧЕРЕЗ ДУГУ

Знание основных закономерностей переноса металла через дугу при электрической сварке плавлением имеет большое практическое значение, так как характер переноса металла оказывает влияние на технологические и металлургические процессы, качество и внешний вид шва.

Как установлено исследованиями и скоростной киносъемкой, перенос металла в электрической дуге осуществляется каплями разных размеров, причем независимо от положения, при котором выполняется сварка, капли всегда переходят с электрода на изделие.

Образование капель, их отрыв от электрода и перенос в дуге вызван рядом факторов: электромагнитными силами, силой тяжести, силой поверхностного натяжения жидкого металла, неравномерной напряженностью электрического поля, давлением образующихся газов внутри капли и реактивным действием потока газов, образующихся в «чехольчике» покрытия при сварке толстопокрытыми электродами. Рассмотрим влияние отдельных факторов.

Электромагнитные силы возникают вследствие появления магнитного поля вокруг проводника, по которому протекает электрический ток. Они оказывают сжимающее действие на проводник и в том числе на каплю металла, образующуюся на торце электрода. Магнитное сжатие способствует образованию «шейки» (рис. 25), и тем самым отрыву капли от электрода и переходу ее на свариваемое изделие.

Сила тяжести капли проявляется в стремлении капли перемещаться по вертикали сверху вниз; она способствует

переносу капли через дугу при нижней сварке, но противодействует переносу капли при потолочной и частично при вертикальной сварке.

Сила поверхностного натяжения, обусловленная действием межмолекулярного притяжения, стремится придать расплавленному металлу на конце электрода сферическую форму, а капле — форму шара при ее перемещении в дуге, и способствует слиянию капли с жидким металлом ванны. Сила поверхностного натяжения связана прямой зависимостью с размером капли: чем больше сила поверхностного натяжения, тем больше размер капли. Введением в атмосферу дуги элементов, снижающих поверхностное натяжение металла, можно уменьшить размер капель.

Сила поверхностного натяжения способствует также удержанию жидкого металла ванны от вытекания при сварке в потолочном и вертикальном положениях.

Неравномерность напряженности электрического поля возникает вследствие того, что плотность тока в электроде значительно выше плотности тока в изделии, в связи с чем и напряженность электрического поля зоны электрода больше напряженности электрического поля зоны сварочной ванны. Поэтому создается продольная сила, которая направлена от высокой напряженности к низкой, т. е. от электрода к сварочной ванне. Эта сила и содействует переносу капли от электрода к изделию.

Сила внутреннего давления газов возникает в результате протекания металлургических процессов в расплавленном металле «шейки» и капли, сопровождающихся образованием газообразной окиси углерода, объем которой во много раз превышает объем расплавленного металла. Вследствие этого мгновенно выделяющийся из металла газ способствует отрыву, дроблению и переходу капли на изделие.

Сила реактивного действия газов, образующихся в чехольчике (см. рис. 2) при сварке толстопокрытыми электродами, возникает вследствие того, что покрытие в первую очередь расплавляется и частично испаряется внутри чехольчика, где образуется большое количество газов, значительно увеличивающееся в объеме вследствие интенсивного нагревания. Это и приводит к появлению реактивной силы газов, отбрасывающих капли от электрода к изделию.

Установлено, что чем меньше размер капель, тем меньше время их нахождения на торце электрода, благодаря

чему металл капли меньше нагревается, а скорость плавления электрода увеличивается, так как передача теплоты дуги твердому металлу происходит через меньший слой жидкого металла.

Мелкокапельный перенос металла улучшает стабильность горения дуги. Поэтому часто применяют специальные меры по уменьшению размеров капель путем вибрации электрода с амплитудой в десятые доли миллиметра за счет специальных устройств, что наряду с измельчением капель ускоряет плавление электродной проволоки.

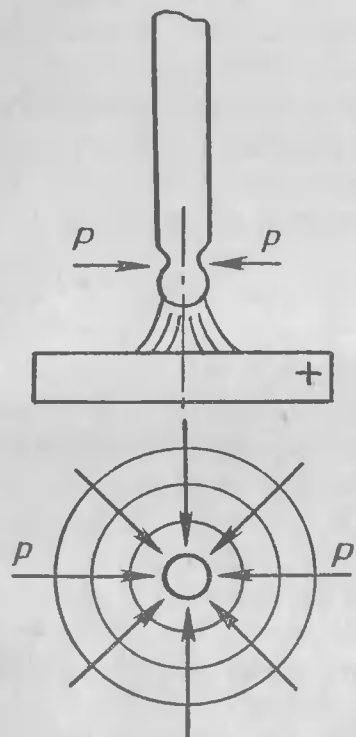


Рис. 25. Сжимающее действие силовых магнитных линий на конец расплавленного электрода

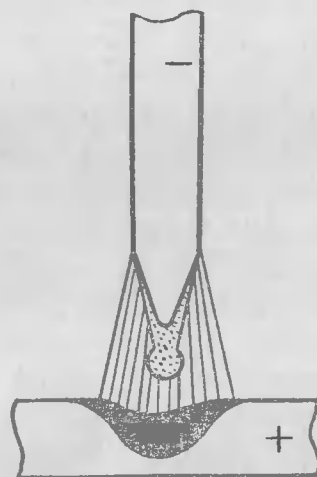


Рис. 26. Схема образования и переноса капли через дугу при сварке с повышенной силой тока

Повышение силы сварочного тока при том же диаметре сварочной проволоки приводит к мелкокапельному переходу металла. Так как при этом катодное или анодное пятно начинает располагаться на боковой поверхности электрода, благодаря чему конец электрода приобретает конусообразную форму (рис. 26), и капли начинают образовываться на вершине конуса — перенос металла через дугу приобретает мелкокапельный характер.

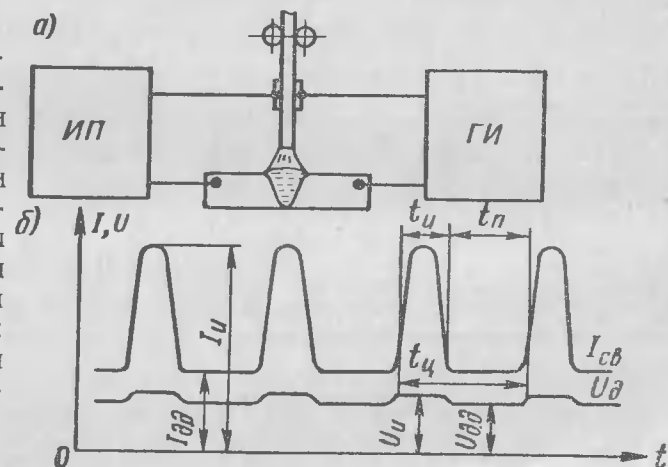
§ 8. ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕНОСА МЕТАЛЛА ПРИ ИМПУЛЬСНО-ДУГОВОЙ СВАРКЕ

Увеличение производства сварных конструкций из тонких материалов при необходимости их сварки во всех пространственных положениях потребовало раз-

работки способа дуговой сварки, при котором имелась бы возможность управления процессом плавления и переноса электродного металла, формой проплавления и шва, а также ходом металлургических реакций. Это достигается применением импульсно-дуговой сварки как плавящимся, так и неплавящимся электродом.

При импульсно-дуговой сварке плавящимся электродом за счет импульсного устройства (рис. 27, а) на основные параметры режима ($I_{св}$, $U_{д}$) дополнительно накладываются импульсы тока и напряжения ($I_{и}$, $U_{и}$)

Рис. 27. Элементы процесса импульсно-дуговой сварки: а — схема подключения источника питания дуги ИП генератора импульсов ГИ к электроду и изделию; б — характер изменения силы тока и напряжения при импульсно-дуговой сварке плавящимся электродом; $I_{д.д}$ и $U_{д.д}$ — ток и напряжение дежурной дуги; $t_{ц}$ — длительность цикла



продолжительностью $t_{и}$ и интервалами — паузами $t_{п}$. Упрощенно это можно себе представить так, что в цепь дуги с определенными параметрами $I_{св}$ и $U_{д}$ вводятся импульсы тока и напряжения с регулируемой частотой, амплитудой и длительностью (рис. 27, б). Благодаря изменению этих параметров достигается управление плавлением и переносом электродного металла, проплавлением свариваемых кромок, ходом металлургических процессов и, в итоге, свойствами сварного соединения. Стабильный процесс с мелкокапельным переходом может быть получен в диапазоне значительно меньших токов, чем при обычном процессе дуговой сварки. Основной особенностью переноса металла при импульсно-дуговой сварке является то, что при импульсном увеличении тока возрастает электромагнитная сила, сжимающая перешеек жидкой капли у нерасплавившейся проволоки и сбрасывающая каплю в определенные заданные моменты времени строго в направлении оси электрода.

Для нормального протекания процесса импульсно-дуговой сварки длительность импульсов и пауз выбирают

из условий так, чтобы во время пауз осуществлялось лишь расплавление конца электрода, а отрыв капли металла происходил бы в момент окончания импульса сварочного тока.

При ведении процесса, когда каждый импульс сбрасывает по одной капле, можно, изменив частоту следования импульсов, достаточно точно управлять ходом ряда процессов при сварке. А это приводит к тому, что окисление металла, угар примесей и насыщение шва вредными газами при импульсно-дуговой сварке меньше, чем при обычном процессе сварки плавящимся электродом на тех же токах. Кроме того, по сравнению с обычной дуго-

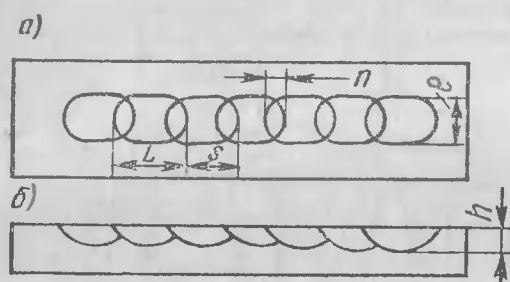


Рис. 28. Схема образования сварного шва при импульсно-дуговой сварке неплавящимся электродом путем перекрывания сварочной ванны: а — вид сверху; б — вид в продольном сечении; n — перекрывание; L — длина сварочной ванны; S — шаг; h — глубина провара

вой сваркой плавящимся электродом в защитных газах импульсно-дуговая сварка обладает следующими преимуществами:

- 1) возникает возможность управления процессом переноса металла;
- 2) улучшается формирование шва;
- 3) значительно уменьшается разбрызгивание;
- 4) возникает возможность производить сварку во всех пространственных положениях;
- 5) увеличивается диапазон сварочного тока для всех диаметров проволоки;
- 6) повышается производительность процесса.

Все это обусловило внедрение импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом в инертных газах алюминевых, титановых и других активных металлов малых и средних толщин.

Импульсно-дуговая сварка неплавящимся электродом заключается в том, что плавление металла производится дугой, горящей периодически, отдельными импульсами с определенными интервалами во времени. Сплошной шов при этом получается путем расплавления отдельных точек с заданным перекрытием предыдущей точки (рис. 28). Каждая предыдущая точка является жесткой связью

при расплавлении и застывании последующей точки, что устраняет «провисание» металла шва при сварке «на весу» и уменьшает остаточные деформации на 20—35 %.

Необходимым условием получения качественных швов при сварке неплавящимся электродом импульсной дугой являются стабильное возбуждение дуги и достаточно точная регулировка длительности импульса и паузы. Первоначальное зажигание дуги обычно осуществляется осциллятором, который затем отключается. Для обеспечения стабильности повторного возбуждения импульсной дуги между вольфрамовым электродом и свариваемым изделием постоянно поддерживается, от самостоятельного источника питания, маломощная дуга, на которую накладывается импульсная дуга. Ток «дежурной» дуги и поддерживает дуговой промежуток в ионизированном состоянии. Регулировка длительности импульса и паузы достигается за счет соответствующего устройства источника импульсов.

Импульсно-дуговая сварка неплавящимся электродом позволяет регулировать тепловую энергию, вводимую в металл не только за счет изменения сварочного тока, но также за счет изменения длительности импульса и паузы. Это позволяет регулировать в широких пределах проплавленную способность дуги, что очень важно при сварке малых толщин, где она и находит преимущественное применение и дает возможность улучшить физические и механические свойства сварного шва; избежать вероятности появления пор, прожогов и непроваров; уменьшить остаточные деформации.

§ 9. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ

Электрическая, тепловая и эффективная тепловая мощность процесса электрической сварки плавлением

Сварочная дуга является мощным концентрированным источником теплоты; большая часть электрической энергии, потребляемой дугой, превращается в тепловую. Распределение теплоты вдоль дугового промежутка происходит в соответствии с падением напряжения в его

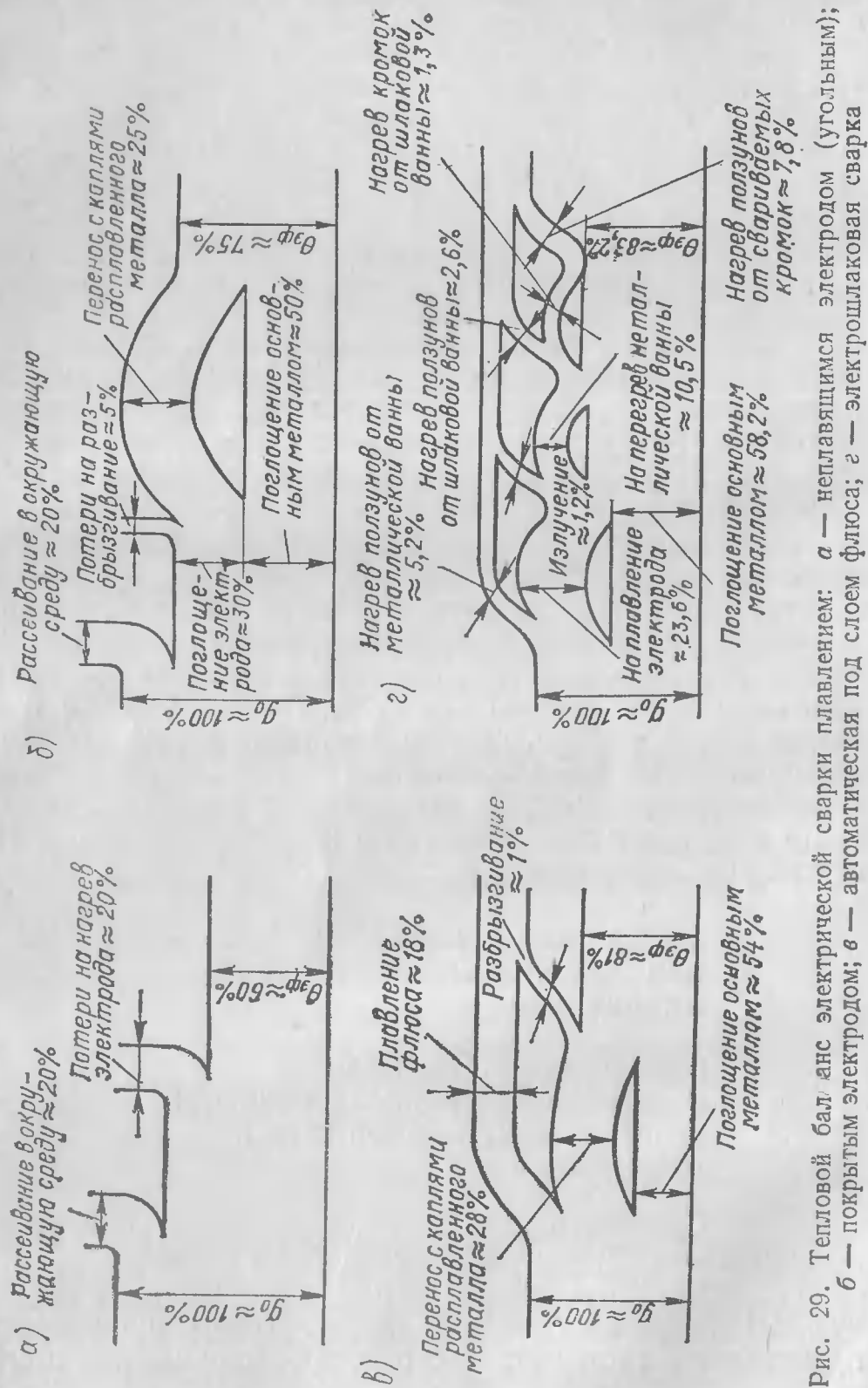


Рис. 29. Тепловой баланс электрической сварки плавлением: а — неплавящимся электродом (угольным); б — покрытым электродом; в — автоматическая под слоем флюса; г — электрошлаковая сварка

областях (см. рис. 16). При электрошлаковой сварке теплота получается за счет прохождения тока по шлаковой ванне.

Электрическая мощность (Вт) для обоих видов сварки может быть выражена уравнением

$$P = I_{\text{св}} U_{\text{св}}, \quad (10)$$

где $I_{\text{св}}$ — ток, протекающий по сварочной цепи, А; $U_{\text{св}}$ — напряжение в дуге или шлаковой ванне, В.

Электрическая энергия, потребляемая при электрической сварке, в основном превращается в тепловую. Поэтому полную тепловую мощность сварочной дуги или шлаковой ванны в ваттах (не учитывая потери, связанные со световым излучением и химическими реакциями) можно определить по уравнению

$$Q = k I_{\text{св}} U_{\text{св}}, \quad (11)$$

где k — коэффициент, учитывающий влияние, оказываемое несинусоидальностью кривых напряжения и тока (см. рис. 18) на мощность дуги.

Поэтому при сварке на постоянном токе коэффициент k принимается равным единице, а при сварке на переменном токе, в зависимости от состава атмосферы дуги, состава шлака шлаковой ванны, теплофизических свойств электродов и соотношения между холостым ходом источника питания дуги и напряжением дуги, значение k принимается 0,70—0,97. Не вся теплота, выделяемая дугой (или током, проходящим через шлаковую ванну при электрошлаковой сварке), используется полностью, часть ее расходуется непроизводительно.

Характер использования полной тепловой мощности процесса можно установить по тепловому балансу, наглядно показывающему, как и на что расходуется полная тепловая мощность при дуговой или шлаковой сварке (рис. 29).

Из приведенных графиков теплового баланса видно, что только часть полной тепловой мощности процесса расходуется на нагрев и плавление основного и электродного металла, т. е. собственно на сварку, что и характеризует эффективную тепловую мощность процесса.

Эффективная тепловая мощность процесса электрической сварки плавлением есть количество теплоты, введенное источником нагрева в изделие в единицу времени.

Другая часть расходуется на теплоотдачу в окружающую среду, нагрев ползунов и др.; эта часть составляет потери теплоты при сварке.

Эффективная тепловая мощность (Вт) процесса электрической сварки плавлением меньше полной тепловой мощности и может быть определена по уравнению:

$$Q_{\text{эф}} = Q\eta = kl_{\text{св}}U_{\text{св}}\eta; \quad (12)$$

$$\eta = Q_{\text{эф}}/Q, \quad (13)$$

где η — эффективный КПД нагрева изделия, который представляет отношение эффективной тепловой мощности дуги (или электрошлакового процесса) к полной тепловой мощности. Определяется калориметрическим методом.

Приведем значения η для некоторых способов сварки:

Для дуговой сварки:

голым или тонкопокрытым электродом . . .	0,50—0,65
неплавящимся электродом в защитном газе . . .	0,50—0,60
толстопокрытыми электродами	0,60—0,85
под флюсом	0,80—0,95

Для электрошлаковой сварки 0,70—0,85

Эффективная тепловая мощность зависит от способа сварки, состава покрытия и флюса, материала электрода, а также типа шва. Так, например, при одной и той же электрической мощности η дуги будет больше при сварке стыкового соединения с разделкой кромок, чем при наплавке на плоскость. Теплота, выделяемая в дуге, наиболее рационально используется при автоматической сварке.

Нагрев электродов и сварочной проволоки дугой, шлаковой ванной и током

При дуговой сварке нагрев и плавление электрода осуществляются за счет энергии, выделяемой дугой в активном пятне, расположенном на его торце, нагревающей электрод на небольшую длину (не более 10 мм) и теплоты Ленца—Джоуля, выделяемой при прохождении тока по вылету электрода. (Вылетом называется участок электрода от места контакта с токоподводящим устройством до его конца). При сварке вручную вылет электрода составляет 200—400 мм в начале сварки и 30—40 мм в мо-

мент окончания плавления электрода. При автоматической и полуавтоматической сварке под флюсом и в защитных газах вылет в зависимости от диаметра и теплофизических свойств электродной проволоки изменяется от 12 до 70 мм, мало меняясь в процессе плавления (рис. 30).

Количество теплоты (Дж), выделяемое током по закону Ленца—Джоуля, равно

$$Q_x = I^2 \frac{\rho l}{F} t, \quad (14)$$

где ρ — удельное сопротивление, Ом·м; F — площадь сечения электрода, м²; l — длина вылета, м; t — время протекания тока, с.

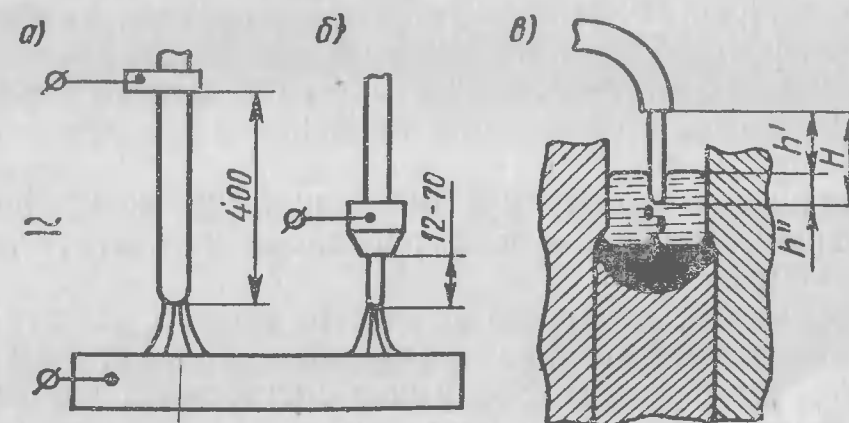


Рис. 30. Вылет электрода при ручной сварке (а), полуавтоматической и автоматической сварке под флюсом или в защитных газах (б) и электрошлаковой сварке (в)

Из уравнения следует, что количество теплоты, выделяемое в электроде в единицу времени, будет тем больше, чем больше плотность тока, удельное сопротивление и вылет электрода. Это при ручной сварке приводит к значительному повышению температуры электрода, что ограничивает величину тока, применяемую при этом способе сварки. Установлено, что нормальное качество шва будет обеспечено, если температура огарка в момент окончания расплавления электрода не будет превышать 600—700 °С.

Нагрев огарка электрода до более высоких температур приводит к отслаиванию покрытия, ухудшению формирования шва и увеличению потерь на разбрызгивание.

Механизированные способы сварки, благодаря малому вылету электрода, позволяют применять большую плотность тока.

При шлаковой сварке сварочная проволока в основном плавится за счет теплоты шлаковой ванны, в которой при прохождении тока через шлак происходит преобразование электрической энергии в тепловую, и частично проволока плавится за счет теплоты, выделяющейся на вылете электрода. Различают «мокрый» и «сухой» вылет электрода. Мокрым вылетом называют участок электрода, погруженный в шлаковую ванну. Сухим вылетом называют участки электрода от места подвода тока до поверхности шлаковой ванны.

Основным источником нагрева электрода при шлаковой сварке является не вся шлаковая ванна, а ограниченный объем сильно перегретого шлака, примыкающего к торцу электрода (рис. 30, в). Через этот объем проходит основная часть сварочного тока, и в нем-то и происходит превращение основного количества электрической энергии в тепловую, а за счет этой теплоты происходит плавление сварочной проволоки.

Увеличение вылета электрода приводит к усилению предварительного подогрева проволоки за счет теплоты Ленца—Джоуля.

Интенсивность нагрева на участке мокрого вылета при электрошлаковой сварке значительно больше, чем на участке сухого вылета. Этому еще способствует тот факт, что удельное сопротивление малоуглеродистой стали при нагреве до 1400 °С возрастает в 9—10 раз. Рассмотренное приводит к тому, что количество расплавленного электродного металла, при токе в 1 А, протекающего по электроду при электрошлаковой сварке, в 1,5—2 раза больше, чем при автоматической дуговой сварке под флюсом.

Производительность процесса дуговой и электрошлаковой сварки

Производительность процесса электрической сварки плавлением в единицу времени в зависимости от способа сварки оценивается по-разному, например: а) при сварке плавящимся электродом она может оцениваться по двум признакам: по массе расплавленного электродного металла $m_э$ или массе наплавленного металла $m_н$, определяемого как избыток массы изделия после сварки; б) при сварке неплавящимся электродом с введением дополнительного металла — по массе дополнительно наплавленного металла $m_д$; в) при сварке непла-

вящимся электродом без ввода дополнительного металла — по массе расплавленного основного металла m_p .

Масса расплавленного электродного металла (г) за время горения дуги может быть определена по формуле

$$m_э = \alpha_э I_{св} t_о, \quad (15)$$

где $\alpha_э$ — коэффициент плавления электродного металла, показывающий массу электродного металла в граммах, расплавленного сварочным током 1 А в единицу времени (обычно в 1 ч), измеряется в граммах на 1 А·ч, г/(А·ч); $I_{св}$ — сварочный ток, А; $t_о$ — время горения дуги (основное время сварки), ч.

Так как во время сварки часть электродного металла теряется на испарение и разбрызгивание, то масса наплавленного металла будет обычно меньше массы расплавленного электродного металла. Масса наплавленного металла может быть определена по формуле

$$m_н = \alpha_н I_{св} t_о, \quad (16)$$

откуда

$$\alpha_н = m_н / I_{св} t_о, \quad (17)$$

где $m_н$ — масса наплавленного металла, г; $\alpha_н$ — коэффициент наплавки, показывающий, сколько металла с плавящегося электрода под действием силы сварочного тока в 1 А перейдет на основной металл в единицу времени.

Но, как ранее указывалось, часть электродного металла в процессе сварки теряется на испарение и разбрызгивание, при ручной сварке плавящимся электродом — на огарки, а при полуавтоматических и автоматических способах сварки — на неиспользуемые куски электродной проволоки, остающейся в шлангах держателей полуавтоматов и головок автоматов и т. п. Поэтому, чтобы правильно определить количество необходимых электродов или электродной проволоки, следует учитывать потери электродного металла.

Потери электродного металла оцениваются коэффициентом потерь ψ , который для способов электрической сварки плавящимся электродом может быть определен по формуле

$$\psi = \frac{m_э - m_н}{m_э} 100 = \frac{\alpha_э I_{св} t_о - \alpha_н I_{св} t_о}{\alpha_э I_{св} t_о} 100 = \left(1 - \frac{\alpha_н}{\alpha_э}\right) 100\% \quad (18)$$

или

$$\alpha_n = \alpha_o (1 - \psi). \quad (19)$$

Из уравнения (19) следует, что, зная коэффициенты плавления и потерь, можно определить коэффициент наплавки.

Коэффициент плавления, как правило, больше, чем коэффициент наплавки. Однако в тех случаях, когда по-

$\alpha_o, \alpha_n, \text{г/(А·ч)}$

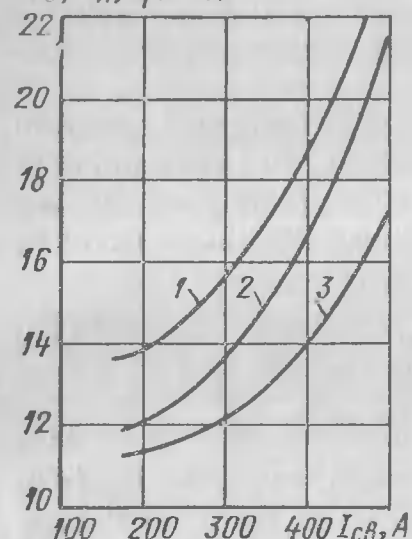


Рис. 31. Изменение величин α_o и α_n с увеличением силы сварочного тока:

- 1 — α_o при сварке в среде CO_2 ;
2 — α_n при сварке в среде CO_2 ;
3 — α_n при сварке под флюсом

тери электродного металла могут в той или иной мере компенсироваться переходом в шов металла, из покрытия за счет ферросплавов, металлов восстановленных из окислов, железного порошка, вводимого в покрытие, или присадочного металла, вводимого в плавильную зону в процессе сварки, коэффициент наплавки может оказаться больше коэффициента плавления. Введение в покрытие железного порошка в количестве 30—50 % от массы покрытия дает возможность получить α_n на 20—30 % больше α_o . В этом случае коэффициенту потерь условно приписывают отрицательное значение.

Коэффициенты α_o , α_n , ψ меняются в зависимости от спо-

соба сварки, марки электродов, плотности тока на электроде, полярности тока, состава атмосферы дуги, напряжения на дуге.

При электрошлаковой сварке α_o в 1,5—2,0 раза больше, чем при сварке под флюсом.

Зависимость α_n и α_o от силы сварочного тока при сварке в среде углекислого газа CO_2 по сравнению со сваркой под слоем флюса (при одинаковых условиях) может быть представлена на рис. 31, из которого видно, что увеличение сварочного тока приводит к увеличению α_o и α_n и что α_n при сварке в среде CO_2 значительно превышает коэффициент наплавки при сварке под слоем флюса. Это объясняется тем, что потери теплоты на лучеиспускание, испарение и унос каплями разбрызгиваемого металла

Таблица 3. Значения коэффициентов плавления, наплавки и потерь

Электрод	Ток и полярность	Кэф-фици-ент по-крытия, %	Напряжение дуги, В	Коэффициент		
				плавления	наплавки	потерь, %
				г/(А·ч)		
Без покрытия (голый) С меловым покрытием	Постоянный прямой полярности	—	15—20	12—15	10—14	10—15
		2—3	13—17	6,5—7,5	5,5—6,5	15—20
УОНИ-13/55	Постоянный прямой полярности	30—40	20—25	8,5—9,5	7—8	15—20
		30—40	22—26	9,0—10	8,5—9,5	3—10
АНО-4с	Переменный	35—40	—	—	8,0—8,3	—

при сварке в среде CO_2 меньше количества теплоты, расходуемого на плавление флюса при сварке под флюсом. Из графика также следует, что при сварке в среде CO_2 с увеличением тока наблюдается уменьшение разности $\alpha_o - \alpha_n$, что равнозначно уменьшению ψ . Это объясняется тем, что при больших плотностях тока наблюдается струйный переход капель металла с электрода в шов, в связи с чем уменьшаются потери металла на разбрызгивание.

Влияние полярности на коэффициент плавления и наплавки объясняется изменением теплового баланса катодного и данного участков сварочной дуги. Так, при сварке плавящимся электродом под флюсом, в среде CO_2 α_n значительно выше при прямой полярности, чем при обратной.

Значения коэффициентов плавления, наплавки и потерь для некоторых марок электродов приведены в табл. 3.

Понятие об энергии сварки

Погонная энергия сварки (Дж/см) характеризует количество теплоты в джоулях, затраченное на единицу длины сварного шва для однократного шва или валика длиной в 1 см, и может быть определена

как отношение эффективной тепловой мощности дуги $Q_{эф}$ к скорости ее перемещения

$$q_{п} = \frac{Q_{эф}}{v} = \frac{IU_{д}\eta}{v}. \quad (20)$$

Установлено, что поперечное сечение однопроходного шва или валика многопроходного шва, выполненного дуговой сваркой, будет находиться в прямой зависимости от ее погонной энергии.

Рассмотрим, как между собой связаны масса наплавленного металла $m_{п}$, время горения дуги t_0 , скорость перемещения v и сечение валика F (см²):

$$m_{п} = \alpha_{п} I_{св} t_0; \quad (21)$$

$$m_{п} = F \gamma l, \quad (22)$$

где γ — плотность, г/см³; l — длина шва, см.

Скорость перемещения дуги может быть выражена следующим уравнением:

$$v = l/t_0,$$

тогда

$$m_{п} v = \alpha_{п} I_{св} l \text{ и } I_{св}/v = F \gamma / \alpha_{п}.$$

Подставим это выражение в уравнение (20), получим

$$\frac{Q_{эф}}{v} = \frac{U_{д} \eta \gamma}{\alpha_{п}} F. \quad (23)$$

Рассмотрим полученное выражение погонной энергии для случая ручной сварки электродом УОНИ-13/45, когда напряжение на дуге может быть принято $U_{д} = 25$ В, эффективный КПД дуги $\eta = 0,8$ и $\alpha_{п} = 9,0$ г/(А·ч) и для случая автоматической сварки под слоем флюса ОСЦ-45, когда $U_{д} = 36$ В, $\alpha_{п} = 13$ г/(А·ч), а $\eta = 0,85$.

Подставив в выражение (23) значение составляющих величин для электродов УОНИ-13/45, получим

$$\frac{Q_{эф}}{v} = \frac{25 \cdot 0,8 \cdot 7,8 \cdot 3600}{9,0} F = 62\,400 F,$$

где 3600 введено для перевода 1 ч в секунды; а при сварке под флюсом ОСЦ-45

$$\frac{Q_{эф}}{v} = \frac{36 \cdot 0,85 \cdot 7,8 \cdot 3600}{13} F = 66\,000 F.$$

Учитывая, что значение таких величин, как $\alpha_{п}$ и η , при дуговой сварке может колебаться в больших пределах,

чем разница между коэффициентами 62 400 и 66 000, для обоих способов сварки можно принять

$$Q_{эф}/v = 65\,000 F. \quad (24)$$

В тех случаях, когда расчет погонной энергии сварки площади сечения шва, выраженной в квадратных миллиметрах, уравнение (24) примет вид

$$q_{п} = Q_{эф}/v = 650 F. \quad (25)$$

Найденная зависимость между сечением и энергией на 1 см шва позволяет без длительных расчетов определить, зная значение погонной энергии, сечение валика, и наоборот, зная сечение валика, погонную энергию.

Пример 1. Требуется определить погонную энергию сварки, если известно, что площадь сечения валика равна 60 мм².

Известно, что $Q_{эф}/v = 650 F$, тогда $Q_{эф}/v = 650 \cdot 60 = 39\,000$ Дж/см.

Пример 2. Известно, что погонная энергия сварки составляет 26 000 Дж/см. Найти сечение валика.

Известно, что $Q_{эф}/v = 650 F$, тогда $F = 26\,000/650 = 40,0$ мм².

§10. РАСЧЕТЫ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ

Теория распространения теплоты при сварке, разработанная Н. Н. Рыкалиным, имеет важное значение и позволяет рассчитать изменение температурного поля в изделии и установить:

1) глубину проплавления основного металла, размеры зоны термического влияния и сварочной ванны;

2) скорости охлаждения наплавленного металла в околошовной зоне, на основании чего определяются возможные изменения структуры металла на участках сварного соединения;

3) влияние скорости деформирования металла шва и околошовной зоны в интервале температур пониженной пластичности на вероятность образования кристаллизационных трещин;

4) участки металла, где возникают упругие напряжения и остаточные деформации при сварке.

Неустановившийся и установившийся тепловой процесс

В начале сварки имеет место неустановившийся тепловой процесс, при котором количество теплоты, поступающей от источника нагрева, больше, чем количество теп-

лоты, отводимой за счет теплопроводности. При этом площадь, занимаемая изотермами определенных температур, увеличивается. Это часто и является причиной непроваров начальных участков шва. По прошествии некоторого времени наступает равновесие между количеством теплоты, поступающей от источника и отводимой в основной металл. При этом площадь, занимаемая изотермами определенных температур, остается постоянной. Первый период характеризует неустановившийся тепловой процесс, а второй период — установившийся.

Во всех последующих расчетах полагаем наличие установившегося теплового процесса.

Нагрев тела неподжным и подвижным источником теплоты

Тепловые процессы будем рассматривать, считая, что дуга в процессе сварки сохраняет свою мощность постоянной, а также, что непрерывно действующая свароч-

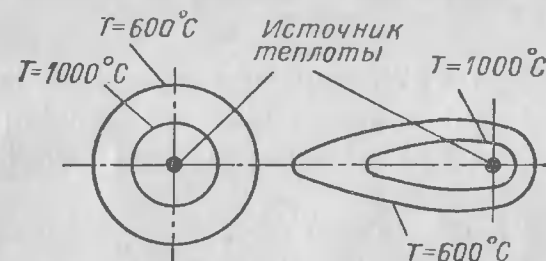


Рис. 32. Вид изотерм 600 и 1000 °C; при неподвижном и подвижном источнике

ная дуга может оставаться неподвижной (в этом случае источник называется неподвижным) или источник теплоты перемещается прямолинейно равномерно с постоянной скоростью (подвижный источник).

Процесс распространения теплоты принято изучать в координатных осях, в точке пересечения которых и размещается источник теплоты (дуга). Тогда при передвижении источника перемещаются координаты. Характер распространения температур (вид изотермы) при действии на тело различных источников теплоты показан на рис. 32.

В последнем случае изотермы вытягиваются по направлению движения источника теплоты и перемещаются вместе с ним.

Расчетные схемы нагрева и ввода теплоты в металл дугой. Характер распределения теплоты в изделии очень

сложен, поэтому для упрощения расчетов приняты некоторые допущения, а именно:

1) теплофизические свойства металла с изменением температуры остаются постоянными;

2) температура металла на осях координат в месте действия источника теплоты может достигнуть бесконечности;

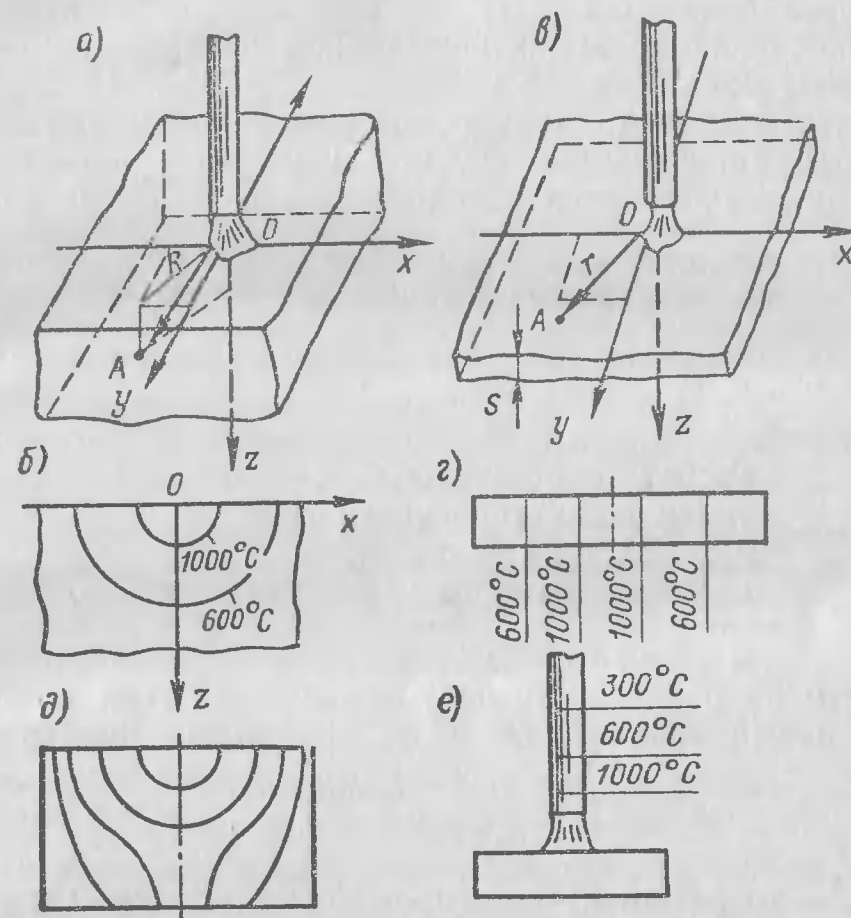


Рис. 33. Расчетные схемы тела и ввода теплоты

3) теплообмен с окружающей средой при действии источника отсутствует.

Для расчетов приняты следующие схемы тела и ввода теплоты.

Схема распределения теплоты в полубесконечном теле. Этой схеме (рис. 33, а) соответствует массивное тело, развитое в трех направлениях пространства — Ox , Oy , Oz и для этой схемы тела принимают точечный источник ввода теплоты. Такой источник теплоты считается сосредоточенным в точке пересечения осей координат и характери-

зуется еще и тем, что в поперечном сечении плоскости тела изотермы изображаются концентрическими полуокружностями с центром в источнике O (рис. 33, б). Это, в частности, соответствует случаю наплавки валика на поверхность массивного изделия.

Схема распределения теплоты в пластине. Этой схеме (рис. 33, в) соответствует лист малой толщины s , развитый в направлениях OX и OY . В этом случае температуру считают равномерно распределенной по толщине листа (рис. 33, г).

Пластине соответствует линейный источник ввода теплоты, характерный тем, что изотермы в поперечном сечении изображаются прямыми по всей толщине листа.

Различают еще схему тела *плоский слой*, являющегося чем-то средним между полубесконечным телом, пластиной (рис. 33, д) и стержнем (рис. 33, е).

В дальнейшем будут рассмотрены условия распространения теплоты только для двух первых схем.

Расчет температуры точки полубесконечного тела при действии подвижного или неподвижного источника

В случае воздействия движущегося источника теплоты на поверхность полубесконечного тела температура любой точки может быть определена по формуле

$$T = \frac{Q_{\text{эф}}}{2\pi\lambda R} e^{-\frac{v}{2a}(x+R)}, \quad (26)$$

где λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(см·°С); R — расстояние точки от источника теплоты, см; a — коэффициент температуропроводности, см²/с; x — проекция рассматриваемой точки на оси OX , см.

Теплофизические свойства для некоторых металлов приведены в табл. 4.

Если же $v = 0$, т. е. источник нагрева неподвижный, формула примет вид

$$T = Q_{\text{эф}}/(2\pi\lambda R). \quad (27)$$

Из формулы (27) следует, что температура точки в полубесконечном теле при действии неподвижного источника теплоты прямо пропорциональна эффективной мощности и

Т а б л и ц а 4. Теплофизические свойства некоторых металлов

Металл	Теплопроводность λ , Вт/(см·°С)	Объемная теплоемкость c_v , Дж/(см³·°С)	Температуропроводность a , см²/с
Низкоуглеродистые и низколегированные стали	0,38—0,42	5,04—5,25	0,075—0,09
Коррозионно-стойкие аустенитные стали	0,25—0,34	4,74—4,83	0,053—0,07
Медь	3,70—3,78	3,86—3,99	0,95—0,96
Латунь	1,18	3,48	0,34
Алюминий	2,73	2,20	1,0
Титан (технический)	0,17	2,85	0,06

обратно пропорциональна коэффициенту теплопроводности и расстоянию данной точки от источника теплоты.

Пользуясь уравнением (27), можно производить расчеты по определению температуры точек, расположенных на некотором расстоянии от дуги, размеров зон проплавления и термического влияния.

Пример 1. Определить температуру точек на полубесконечном теле на расстоянии 1,0; 1,6; 3,0 см от источника теплоты, если известно, что неподвижная дуга горит между толстопокрытым электродом и изделием при $I_{\text{св}} = 300$ А, $U_{\text{д}} = 25$ В.

Теплопроводность и КПД дуги принимаем

$$\lambda = 0,42 \text{ Вт/(см·°С)}, \eta = 0,8.$$

Определяем:

1) эффективную тепловую мощность процесса сварки

$$Q_{\text{эф}} = I_{\text{св}} U_{\text{д}} \eta = 300 \cdot 25 \cdot 0,8 = 6000 \text{ Вт};$$

2) температуру в точке, находящейся на расстоянии 1,0 см от дуги,

$$T = \frac{Q_{\text{эф}}}{2\pi\lambda R} = \frac{6000}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,42 \cdot 1,0} = 2275 \text{ °С};$$

3) температуру в точках, находящихся на расстоянии 1,6 и 3,0 см от дуги,

$$T = \frac{6000}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,42 \cdot 1,6} = 1422 \text{ °С};$$

$$T = \frac{6000}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,42 \cdot 3,0} = 758 \text{ °С}.$$

Расчеты по уравнению (26) для полубесконечного тела сложны, а уравнение для расчета температуры точки на пластине еще более сложное. Поэтому для облегчения этих расчетов уравнения преобразо-

ваны введением так называемых безразмерных величин: одной относительно расстояния ρ , другой относительно температуры θ .

Уравнение безразмерных величин:
для полубесконечного тела:

$$\rho_3 = vR/2a; \quad (28)$$

$$R = 2a\rho_3/v; \quad (29)$$

$$\theta_3 = 4\pi\lambda aT/(Q_{\text{эф}}v); \quad (30)$$

$$T = Q_{\text{эф}}v\theta_3/(4\pi\lambda a); \quad (31)$$

для пластины:

$$\rho_2 = vr/(2a); \quad (32)$$

$$r = 2a\rho_2/v; \quad (33)$$

$$\theta_2 = 2\pi\lambda sT/Q_{\text{эф}}; \quad (34)$$

$$T = Q_{\text{эф}}\theta_2/(2\pi\lambda s), \quad (35)$$

где s — толщина пластины, см.

Зависимость между безразмерными величинами показана на рис. 34. Пользуясь безразмерными величинами, можем произвести расчеты.

Пример 2. Рассчитать глубину проплавления и зону термического влияния (в стали проплавление ограничено изотермой 1500°C , а зона термического влияния — изотермой 721°C) при наплавке валика на полубесконечное тело при $Q_{\text{эф}} = 3780$ Вт, $\lambda = 0,42$ Вт/(см $\cdot^\circ\text{C}$), $v = 0,1$ см/с; $a = 0,08$ см ^{2} /с.

Рис. 34. Зависимость между безразмерными величинами ρ и θ для полубесконечного тела и пластины

1. Определяем по уравнению (30) безразмерную величину изотермы 1500 и 721°C :

$$\theta_3 = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 0,42 \cdot 0,08 \cdot 1500}{3780 \cdot 0,1} = 1,67;$$

$$\theta'_3 = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 0,42 \cdot 0,08 \cdot 721}{3780 \cdot 0,1} = 0,805.$$

2. По полученным значениям безразмерных величин θ_3 и находим по графику рис. 34 безразмерные величины $\rho_3 = 0,4$ и $\rho'_3 = 0,75$.

3. Определяем расстояние от источника до изотерм 1500 и 721°C по пропорциональным им безразмерным величинам ρ_3 и ρ'_3 по уравнению (29):

$$R = \frac{2 \cdot 0,08 \cdot 0,4}{0,1} = 0,64 \text{ см};$$

$$R' = \frac{2 \cdot 0,08 \cdot 0,75}{0,1} = 1,2 \text{ см}.$$

Пример 3. Рассчитать температуру в точке (по оси Y), находящейся на расстоянии 2 см от источника теплоты, при сварке толстопокрытыми электродами пластин из низкоуглеродистой стали толщи-

ной $0,4$ см, $I_{\text{св}} = 200$ А, $U_{\text{д}} = 24$ В, $v = 0,3$ см/с, $\lambda = 0,42$ Вт/(см $\cdot^\circ\text{C}$), $a = 0,08$ см ^{2} /с.

1. Определяем эффективную тепловую мощность $Q_{\text{эф}} = IU_{\text{д}}\eta = 200 \times 24 \cdot 0,75 = 3600$ Вт.

2. Определяем безразмерную величину относительно расстояния

$$\rho_2 = \frac{vr}{2a} = \frac{0,3 \cdot 2}{2 \cdot 0,08} = 3,75.$$

3. Зная ρ_2 , по графику рис. 34 находим безразмерную величину относительно температуры $\theta_2 = 0,21$, а по уравнению (35) — температуру точки

$$T = \frac{Q_{\text{эф}}}{2\pi\lambda s} \theta_2 = \frac{3600 \cdot 0,21}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,42 \cdot 0,4} = 716^\circ\text{C}.$$

Рассмотренная методика позволяет нам вести расчет температур точек на определенном расстоянии от источника теплоты.

Но часто для уяснения характера распределения температур на поверхности тела нас интересует расстояние от подвижного источника теплоты до ряда точек, определяющих положение какой-либо изотермы.

Построение изотерм на поверхности полубесконечного тела и пластины

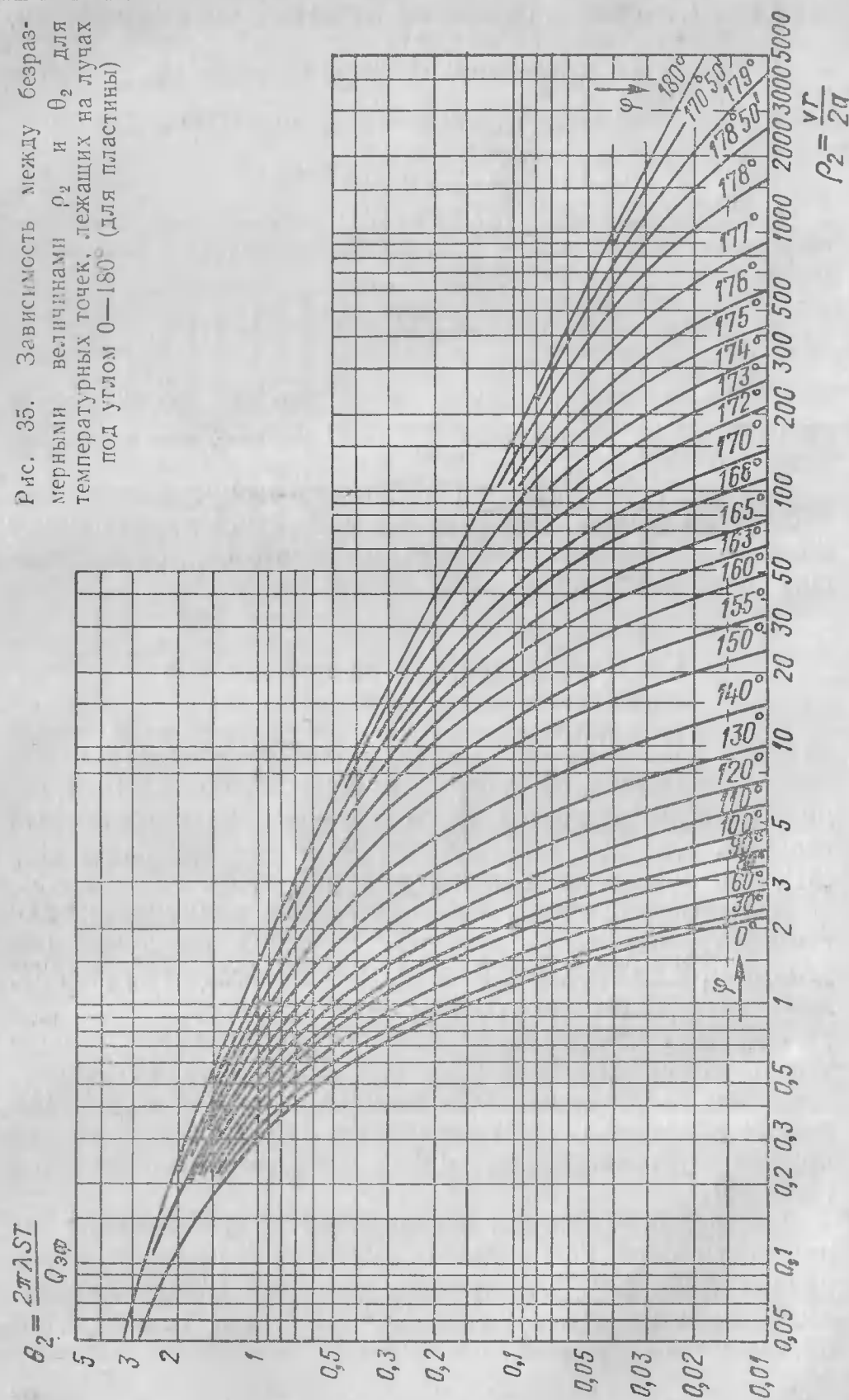
Расчетная часть, предшествующая построению изотерм, основана на использовании безразмерных величин, для полубесконечного тела — уравнения (28)—(31), для пластины — уравнения (32)—(35).

Зависимость между безразмерными величинами для температурных точек изотерм, лежащих на лучах под углами от 0 до 180° , для пластины представлена на рис. 35, для полубесконечного тела она аналогична.

Кривые с пометками от 0 до 180° соответствуют разным углам φ ; кривая $\varphi = 0^\circ$ — оси X впереди источника, кривая $\varphi = 90^\circ$ — оси OY , кривая $\varphi = 180^\circ$ — оси OX позади источника; горизонтальные линии, пересекающие кривые, устанавливают связь безразмерных величин (рис. 35).

Построению изотерм предшествует изображение на плоскости осей координат с лучами под определенными углами (рис. 36). Чем меньше интервал между лучами, особенно в пределах углов 170 — 180° , тем точнее будет построенная изотерма.

Рис. 35. Зависимость между безразмерными величинами ρ_2 и θ_2 для температурных точек, лежащих на лучах под углом $0-180^\circ$ (для пластины)



Аналогично выполняются построения изотерм на бесконечном теле с использованием зависимостей между θ_3 и ρ_6 и соответствующего графика.

Пример 4. Построить изотерму $T = 900^\circ\text{C}$ на пластине $s = 10$ см при действии подвижного источника теплоты при условиях: $Q_{\text{эф}} = 5040$ Вт, $v = 0,2$ см/с, $\lambda = 0,42$ Вт/(см·°C), $a = 0,08$ см²/с.

1. Вычисляем безразмерную величину относительно температуры, соответствующую изотерме 900°C

$$\theta_2 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,42 \cdot 900}{5040} = 0,47.$$

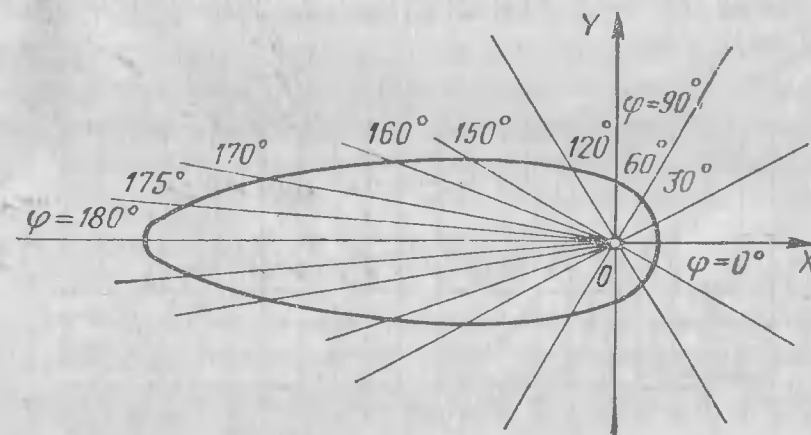


Рис. 36. Изотерма 900°C , построенная по расчетным данным

2. Откладываем на ординате значения θ_2 , мысленно проводим горизонталь и проецируем точки пересечения горизонтали с кривыми, соответствующими углам от 0 до 180° . Находим ρ_2 и подставляем в формулу (33).

3. Находим расстояние от источника теплоты до точки изотермы, лежащей на лучах определенных углов φ . Для нашего случая: $\rho_{\varphi=0} = 0,6$; $\rho_{\varphi=180} = 10$. Тогда расстояние от источника до изотермы для указанных углов составит

$$r = \frac{2a}{v} \rho_2 = \frac{2 \cdot 0,08}{0,2} 0,6 = 0,48 \text{ см}; \quad r = \frac{2 \cdot 0,08}{0,2} 10 = 8 \text{ см}.$$

4. Найденную зависимость между ρ , φ и r приводим ниже; по полученным размерам строим изотерму 900°C (см. рис. 36).

$\varphi, ^\circ$	0	30	60	90	120	150	170	175	177,5	180
ρ_2	0,6	0,7	0,8	1,0	1,7	3,5	7,0	9,0	9,5	10
$r, \text{ см}$	0,48	0,56	0,64	0,8	1,36	2,8	5,6	7,2	7,6	8,0

Распределение температур по оси OX на поверхности полубесконечного тела и пластины

Распределение температур по оси OX в полубесконечном теле зависит от скорости движения источника и теплофизических свойств металла.

При неподвижном источнике теплоты ($v = 0$) температура точки в полубесконечном теле определяется уравнением (27), из которого видно, что по мере уменьшения R температура возрастает и в точке пересечения осей координат, когда $R \rightarrow 0$, температура бесконечно возрастает (рис. 37, а).

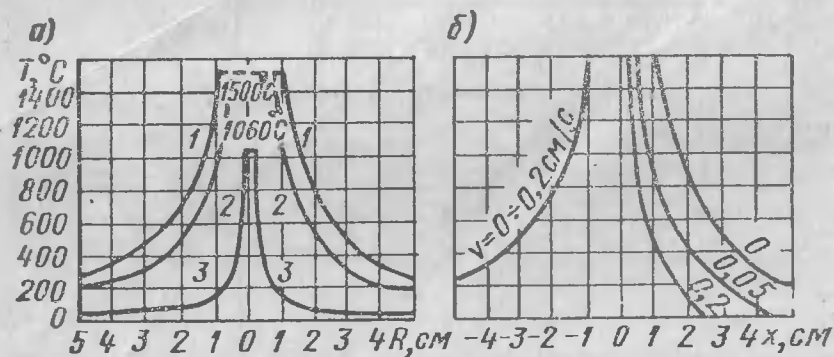


Рис. 37. Распределение температур по оси OX в полубесконечном теле: а — при неподвижном источнике ($Q_{эф} = 3150$ Вт); б — при подвижном источнике (низкоуглеродистая сталь);

1 — низкоуглеродистая сталь; 2 — чугун серый; 3 — медь

По мере увеличения R по оси OX температура уменьшается и распределение температуры по этой оси изображается гиперболой. При этом, чем больше коэффициент теплопроводности материала, тем меньше температура на том же расстоянии от источника теплоты. Так, температура по оси OX на одинаковом расстоянии от источника для стали будет примерно в 7 раз больше, чем для меди.

При подвижном источнике теплоты в полубесконечном теле распределение температур определяется уравнением (26). Для точек на отрицательной полуоси ($X < 0$) подставим в уравнение вместо X значение R с сохранением знака полуоси, тогда

$$T = \frac{Q_{эф}}{2\pi\lambda R} e^{-\frac{v}{2a}(-R+R)} = \frac{Q_{эф}}{2\pi\lambda R},$$

так как $-R + R = 0$.

В результате получим такое же уравнение, как и для неподвижного источника. Следовательно, распределение температуры от подвижного источника на отрицательной полуоси (позади источника) в полубесконечном теле не зависит от скорости перемещения источника, как и при неподвижном источнике.

Для точек, расположенных на положительной полуоси, вместо X подставляем в уравнение R , тогда

$$T = \frac{Q_{эф}}{2\pi\lambda R} e^{-\frac{v}{2a}(-R+R)} = \frac{Q_{эф}}{2\pi\lambda R} e^{-\frac{vR}{a}}.$$

Полученное выражение показывает, что чем скорее движется источник, тем меньше теплоты распространяется впереди источника. Если источник теплоты будет двигаться чрезвычайно быстро, то скорость перемещения дуги может оказаться больше скорости распространения теплоты впереди источника, и вся теплота будет распределяться только позади источника (рис. 37, б). Характер распределения температур по оси абсцисс в пластине во многом подобен рассмотренному для полубесконечного тела. Распределение температур по поверхности зависит от параметров режима сварки ($Q_{эф}$, v , $Q_{эф}/v$) и теплофизических свойств металла.

Влияние параметров режима и теплофизических свойств на форму изотерм

С увеличением скорости перемещения дуги области, нагреваемые выше определенной температуры (например, 600°C), уменьшаются по площади, и изотермы суживаются в направлении, перпендикулярном к оси шва, и сгущаются впереди дуги (рис. 38, а).

С увеличением $Q_{эф}$ дуги области, нагретые выше определенной температуры, значительно увеличиваются (рис. 38, б). Пропорциональные изменения мощности и скорости при постоянной погонной энергии проявляются в том, что площади, ограниченные изотермами одинаковых температур, увеличиваются, так как увеличение мощности оказывает более сильное влияние, чем увеличение скорости (рис. 38, в).

Влияние теплофизических свойств на размеры и форму изотерм при действии подвижного источника теплоты на

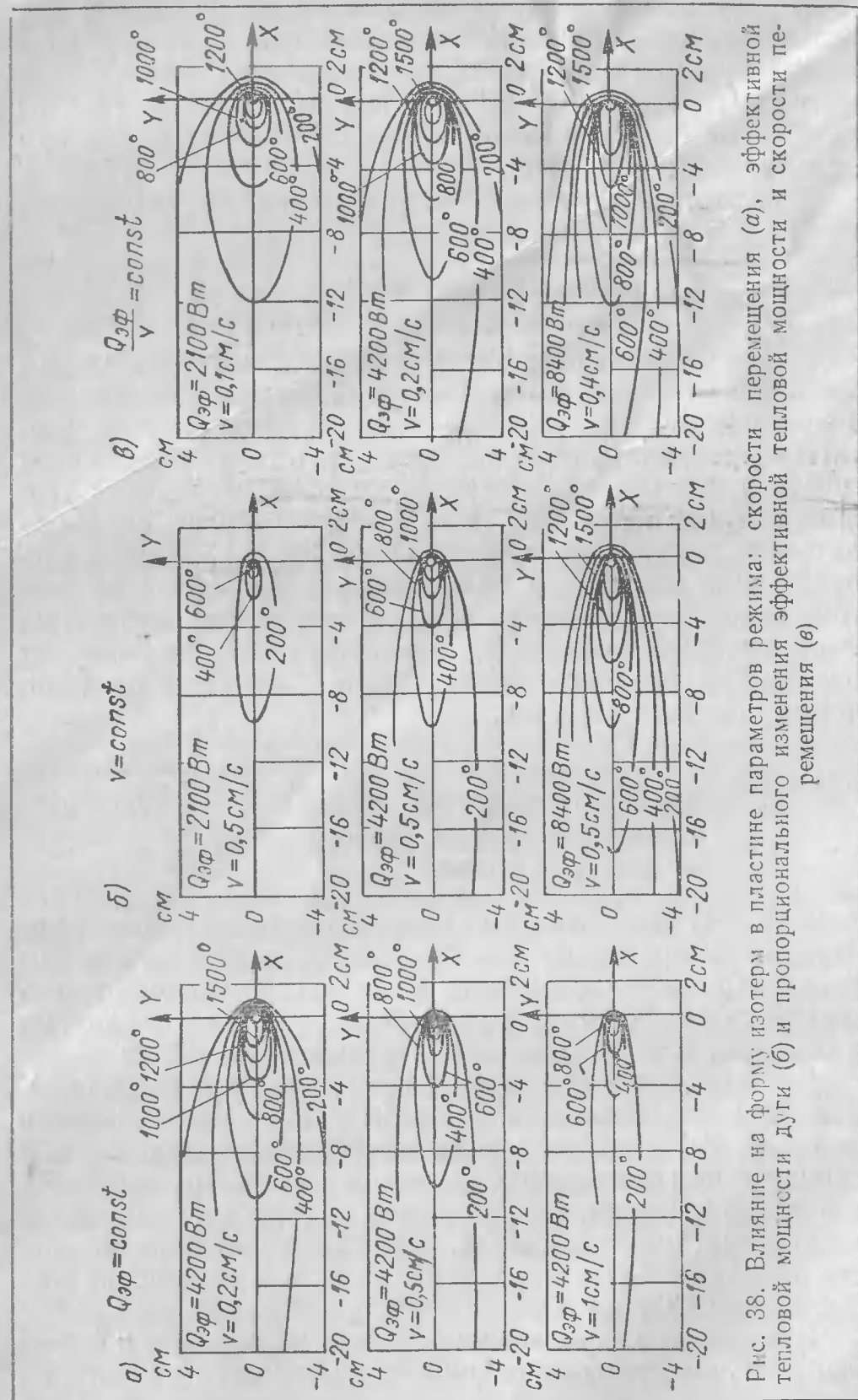


Рис. 38. Влияние на форму изотерм в пластине параметров режима: скорости перемещения (а), эффективной тепловой мощности дуги (б) и пропорционального изменения эффективной тепловой мощности и скорости перемещения (в)

титан, сталь типа 18—19, низкоуглеродистую сталь, алюминий и медь (рис. 39).

Изотермы определенных температур на титане и хромоникелевой стали имеют большие размеры, чем на малоуглеродистой стали, а на цветных металлах (алюминий, медь) размеры рассматриваемых изотерм будут еще меньше,

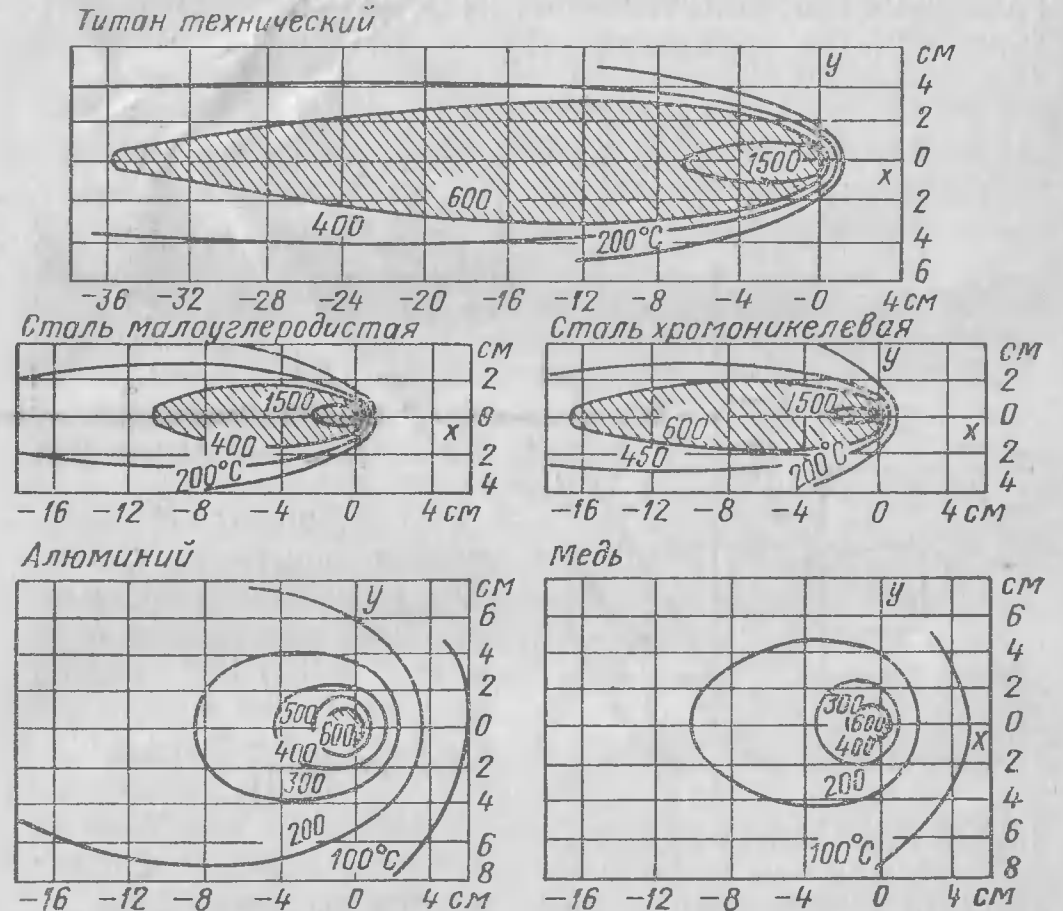


Рис. 39. Влияние теплофизических свойств металла на форму и размеры изотерм в пластине: $S = 1,0$ см, $Q_{эф} = 4200$ Вт; $v = 0,2$ см/с

они укорачиваются, по очертанию приближаются к окружности и смещаются в область впереди источника. Это объясняется высокой теплопроводностью этих металлов.

Расчет длины и времени существования сварочной ванны при дуговой сварке

Размеры сварочной ванны и время ее кристаллизации влияют на качество и формирование шва, особенно на содержание в нем газов.

Расчет длины сварочной ванны L производим, полагая, что наплавка на массивную деталь осуществляется при такой скорости перемещения источника, когда ванна располагается позади источника теплоты, а температура точек по оси OX позади источника не зависит от скорости перемещения. Тогда длина сварочной ванны определяется границами изотермы температуры плавления $T_{пл}$ и $L = R$ (рис. 40). По уравнению (27)

$$T_{пл} = \frac{Q_{эф}}{2\pi\lambda R}; \quad L = \frac{\eta}{2\pi\lambda T_{пл}} I_{св} U_{д.}$$

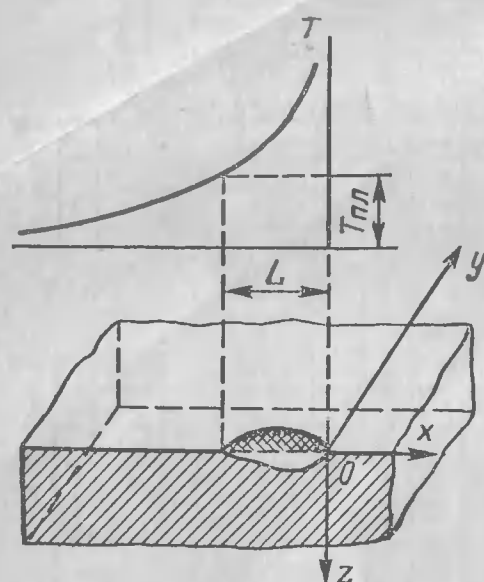


Рис. 40. Схема сварочной ванны при наплавке валика на массивное изделие быстро движущимся источником теплоты

Обозначим через P постоянные члены правой части уравнения

$$P = \eta / (2\pi\lambda T_{пл}),$$

тогда

$$L = P I_{св} U_{д.} \quad (36)$$

Коэффициент P определяют опытным путем. Для ручной сварки плавящимся электродом $P = (1,7 \div 2,3) \cdot 10^{-3}$ мм/Вт, для автоматической сварки под флюсом $P = (2,3 \div 3,0) \times 10^{-3}$ мм/Вт. Изменение коэффициента в указанных пределах связано с изменением η дуги.

Время пребывания металла в жидком состоянии по оси шва связано с длиной ванны и скоростью перемещения дуги

$$t_v = L/v, \quad (37)$$

где L — длина сварочной ванны, мм; v — скорость перемещения дуги, мм/с.

Чем длиннее ванна, тем при прочих равных условиях дольше находится металл в расплавленном состоянии. Это в определенной мере влияет на качество выполненного шва.

ГЛАВА III. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

§ 11. ЭЛЕКТРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

При электрической сварке плавлением применяются: сварочная проволока, неплавящиеся и плавящиеся электродные стержни, покрытые электроды, флюсы, защитные газы и др.

Стальная сварочная проволока, предназначенная для сварки и наплавки, регламентируется ГОСТ 2246—70, где она классифицируется по группам и маркам стали. ГОСТ предусматривает три группы проволок: низкоуглеродистую — 6 марок, легированную — 30 марок и высоколегированную — 39 марок.

Обозначение марок проволоки состоит из сочетания букв и цифр. Первые две буквы Св обозначают сварочную проволоку, а следующие за ними первые две цифры показывают содержание углерода в сотых долях процента; в остальном маркировка сварочной проволоки подобна маркировке сталей. Наличие на конце марки буквы А или АА свидетельствует, что эта проволока изготовлена из более высококачественной стали и содержание в ней вредных примесей серы и фосфора уменьшено. Например, проволока диаметром 4 мм из легированной стали, содержащей ¹ 0,06—0,10 % С; 0,45—0,70 % Si; 1,15—1,45 % Mn; 0,85—1,15 % Cr; не более 0,3 % Ni; 0,40—0,60 % Mo; не более 0,025 % S; не более 0,025 % P, обозначается: 4Св-08ХГСМА (ГОСТ 2246—70).

Примеры обозначения и состав сварочной проволоки по группам приведены в табл. 5.

ГОСТ предусматривает выпуск стальной сварочной проволоки диаметром от 0,3 до 12 мм с чистой гладкой поверхностью в катушках, пригодных для использования при механизированных способах сварки без перемотки.

Проволока с омедненной поверхностью обозначается после марки проволоки буквой О, а проволока, предназначенная для изготовления электродов, обозначается буквой Э. Буквы Ш, ВД или ВИ означают, что проволока изготовлена из стали, выплавленной электрошлаковым или вакуумнодуговым переплавом или же в вакуумноиндукционных печах.

¹ Здесь и далее под содержанием элементов следует понимать массовую долю в процентах.

Таблица 5. Некоторые марки сварочной проволоки по ГОСТ

Марка проволоки	Массовое			
	C	Si	Mn	Cr
Низкоуглеро				
Св-08	≤0,10	≤0,03	0,35—0,60	≤0,15
Св-08А	≤0,10	≤0,03	0,35—0,60	≤0,10
Св-08ГА	≤0,10	≤0,03	0,8—1,1	≤0,10
Легированная				
Св-08Г2С	0,05—0,11	0,70—0,95	1,8—2,1	≤0,20
Св-08ГСМТ	0,06—0,11	0,40—0,70	1,00—1,30	≤0,30
Св-18ХГС	0,15—0,22	0,90—1,20	0,80—1,10	0,80—1,10
Св-18ХМА	0,15—0,22	0,12—0,35	0,40—0,70	0,80—1,10
Св-08ХНМ	≤0,10	0,12—0,35	0,50—0,80	0,70—0,90
Св-08ХЗГ2СМ	≤0,10	0,45—0,75	2,0—2,5	2,00—3,00
Св-10Х5М	≤0,12	0,12—0,35	0,40—0,70	4,00—5,50
Св-08МНФБА	0,06—0,10	0,12—0,30	0,35—0,50	1,10—1,40
Высоколегирован				
Св-10Х11ВМФН	0,08—0,13	0,30—0,60	0,35—0,65	10,50—12,00
Св-06Х14	≤0,08	0,30—0,70	0,30—0,70	13,00—15,0
Св-13Х25Т	≤0,15	≤1,0	≤0,8	23,0—27,0
Св-01Х19Н9	≤0,03	0,50—1,00	1,00—2,00	18,00—20,0
Св-05Х19Н9ФЗС2	≤0,07	1,30—1,80	1,00—2,00	18,0—20,0
Св-08Х21Н10Г6	≤0,10	0,20—0,70	5,0—7,0	20,0—22,0

К каждому мотку проволоки должна быть прикреплена бирка, в которой наряду с наименованием предприятия-поставщика указывается наименование проволоки, марка стали, диаметр проволоки, номер ГОСТа. Кроме того, к каждой партии проволоки прилагается документ, удостоверяющий соответствие проволоки требованиям стандарта (сертификат).

Регламентированная ГОСТом стальная сварочная проволока применяется для изготовления покрытых элект-

2246—70

содержание элементов, %							
Ni	Mo	W	Ti	V	S	P	Прочие элементы
					не более		
дистая проволока							
≤0,30	—	—	—	—	0,04	0,04	≤0,01 Al
≤0,25	—	—	—	—	0,03	0,03	—
≤0,25	—	—	—	—	0,03	0,03	—
проволока							
≤0,25	—	—	—	—	0,025	0,03	—
≤0,30	0,20— 0,40	—	0,05— 0,12	—	0,026	0,03	—
≤0,30	—	—	—	—	0,025	0,03	—
≤0,30	0,15— 0,30	—	—	—	0,025	0,025	—
0,80— 1,20	0,25— 0,45	—	—	—	0,025	0,03	—
≤0,30	0,30— 0,50	—	—	—	0,03	0,03	—
≤0,30	0,40— 0,60	—	—	—	0,25	0,03	—
0,65— 0,90	0,80— 1,00	—	—	0,20— 0,35	0,25	0,25	0,10— 0,23 Nb
ная проволока							
0,80— 1,10	1,00— 1,30	1,00— 1,40	—	0,25— 0,50	0,25	0,03	—
≤0,60	—	—	—	—	0,25	0,03	—
≤0,60	—	—	0,2—0,5	—	0,25	0,035	—
8,0— 10,0	—	—	—	—	0,015	0,025	—
8,0— 10,0	—	—	—	1,8— 2,40	0,025	0,03	—
9,0— 11,0	—	—	—	—	0,018	0,035	—

родов разного назначения, для сварки под флюсом и в среде защитных газов.

Название марок проволоки по группам и подгруппам в определенной мере характеризует и назначение. Так, проволока, легированная кремнием и марганцем, применяется для сварки в углекислом газе углеродистых конструкционных и низколегированных сталей. Проволока других марок находит применение для сварки сталей исходного состава и для наплавочных работ. Группа вы-

соколегированной аустенитной и ферритной сварочной проволоки применяется для сварки коррозионно-стойких, жаростойких сталей и для сварки специальных сталей различного назначения.

Обычно поставляемая сварочная проволока покрыта жировым слоем, который при длительном хранении и особенно повышенной влажности не всегда защищает поверхность проволоки от коррозии. Подготовка такой проволоки к сварке вызывает значительные затраты, поэтому для сварки в углекислом газе целесообразно применять проволоку с омедненной поверхностью. Омедненная прово-

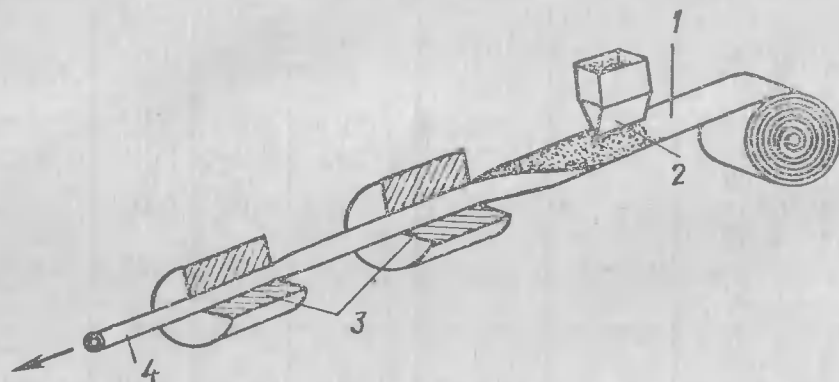


Рис. 41. Схема изготовления порошковой проволоки: 1 — стальная лента; 2 — бункер с шихтой; 3 — фильеры; 4 — порошковая проволока

лока хорошо защищена от воздействия внешней среды и не требует дополнительной обработки перед сваркой, а также создает хороший контакт с токоведущим мундштуком.

Проволоку марок Св-15ГСТЮЦА и Св-20ГСТЮА применяют для дуговой сварки без дополнительной защиты.

В ряде случаев для выполнения сварочных работ го-стированная сварочная проволока не может обеспечить требуемого химического состава наплавленного металла. Тогда применяют порошковую проволоку, представляющую собой низкоуглеродистую стальную оболочку, внутри которой запрессовывается порошок, состоящий из ферросплавов, за счет которых и осуществляется легирование металла, железного порошка, увеличивающего производительность процесса и являющегося заполнителем, и других материалов. Получается порошковая проволока сворачиванием ленты в трубку при волочении ее через фильер, изготовленный из твердого сплава (рис. 41). После первого прохода для уплотнения и запрессовки порошка проволока протягивается последо-

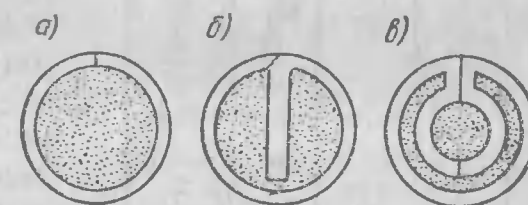
вательно через несколько фильер с разницей в диаметре 0,3—0,5 мм, до получения нужного диаметра.

По способу защиты порошковые проволоки делятся на самозащитные, когда защита зоны сварки осуществляется за счет составляющих сердечника проволоки. Они также используются с дополнительной защитой зоны сварки флюсом или газом, обычно углекислым, или смесью газов.

В практике находят применение трубчатые и более сложные конструкции порошковой проволоки, некоторые из них приведены на рис. 42.

Усложнение конструкции порошковой проволоки вызвано тем, что сварка проволокой трубчатой конструкции

Рис. 42. Некоторые конструкции порошковой проволоки: а — трубчатая; б — с одним загибом в оболочке; в — двухслойная



возможна только на умеренных режимах и обеспечивает неглубокое проплавление, что целесообразно при наплавочных работах. При сварке открытой дугой они не обеспечивают устойчивого и равномерного плавления сердечника. Более сложные конструкции порошковой проволоки приводят к увеличению глубины проплавления, уменьшению выгорания марганца и кремния, снижению содержания кислорода и азота в наплавленном металле, устойчивому и равномерному плавлению сердечника.

По составу сердечника порошковые проволоки делятся на пять типов: рутилоорганические ПП-АН1; карбонатнофлюоритные ПП-АН7; флюоритные ПП-2ДСК; рутиловые ПП-АН10 и рутил-флюоритные ПП-АН9.

Проволоки первых трех типов применяют, как правило, без дополнительной защиты. Проволоки рутилового и рутил-флюоритного типов используют для сварки в углекислом газе.

В настоящее время наряду с указанными типами порошковой проволоки промышленность выпускает большое количество марок проволок для сварки и наплавки сталей, сварки с принудительным формированием металла шва, наплавки бронзы, меди и медно-никелевых сплавов на сталь и др.

Таблица 6. Характеристика некоторых типов самозащитных порошковых проволок

Марка проволоки	Диа- метр, мм	Режим сварки		Производи- тельность, кг/ч	Металл шва				Механические свойства		
					Массовое содержание, %						
		I, А	U, В		С	Mn	Si	σ_B , Н/мм ²	δ_5 , %	KCU, Дж/см ²	
ПП-2Н1	2,8	200—350	24—28	2—5	0,06—0,10	0,6—0,8	0,07—0,15	500—560	18—24	80—120	
	3,0	300—500	25—30	5—9	0,07—0,12	0,2—0,45	0,20—0,45	500—560	24—30	140—180	
	2,3	340—450	25—32	6—8	0,09—0,13	0,13—0,40	0,13—0,40	480—520	22—30	140—170	

В табл. 6 приведены характеристики некоторых типов самозащитных порошковых проволок.

В качестве плавящихся электродов для автоматической наплавки под слоем флюса поверхностей больших размеров и для получения небольшого провара основного металла применяют электродную ленту различного химического состава (в зависимости от назначения) толщиной 0,2—1,0 мм и шириной 15—100 мм. В последнее время все большее применение находит порошковая лента (рис. 43). Порошковая лента сохраняет достоинства электродной ленты и увеличивает диапазон возможностей по легированию наплавленного металла. Разработана порошковая лента, позволяющая получить наплавку, содержащую до 50% легирующих элементов.

Неплавящиеся электродные стержни служат для подвода тока к зоне дуги. Они изготавливаются из электро-технического угля или синтетического графита и из вольфрама.

Угольные и графитовые электроды (ГОСТ 4425—72, ГОСТ 4426—71) имеют высокую температуру плавления и кипения при малой теплопроводности. Изготавливаются они в виде цилиндрических стержней диаметром 5—25 мм, длиной

200—300 мм. Конец электродов затачивается под конус.

Электропроводность графитовых электродов почти в 3 раза больше угольных, и они обладают большей стойкостью против окисления на воздухе при больших температурах, что заметно снижает удельный расход графитовых электродов и позволяет применять повышенные плотности тока.

Часто для обеспечения более устойчивого горения дуги центральная часть электродов (фитиль—канал) заполняется порошкообразной массой, содержащей легко-ионизирующие вещества.

Вольфрамовые электроды находят широкое применение для сварки, что обусловлено высокими теплофизическими свойствами вольфрама: его температура плавления 4500 °С, а температура кипения 5900 °С при хорошей тепло- и электропроводности.

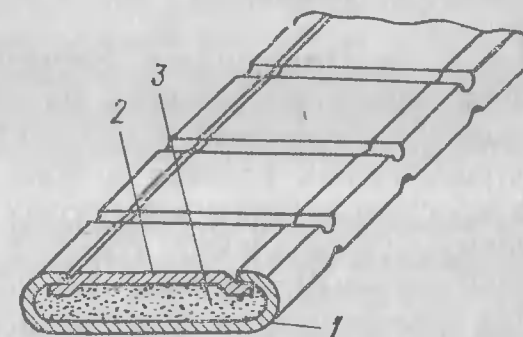


Рис. 43. Порошковая лента:
1 — нижняя лента; 2 — верхняя лента;
3 — шихта

Вольфрамовые электроды изготавливают из чистого вольфрама марки ЭВЧ, с присадкой окиси лантала La_2O_3 , электроды марок ЭВЛ-10 и ЭВЛ-20, с присадкой окиси иттрия Y_2O_3 и металлического тантала Та электроды марки ЭВИ-30. Цифры в обозначении марки вольфрамового электрода указывают количество активизирующей присадки в десятых долях процента.

Наличие этих добавок (2—3 %) обеспечивает зажигание дуги, улучшает устойчивость дугового разряда и повышает стойкость электрода, что позволяет значительно увеличивать плотность тока.

Электроды из чистого вольфрама обычно применяют для сварки переменным током, а электроды из вольфрама с активизирующими присадками — как для сварки переменным, так и постоянным током прямой и обратной полярности.

Наилучшими сварочными характеристиками обладают вольфрамовые электроды с присадкой 3 %-ной окиси иттрия.

Иттрированные электроды превосходят торированные и лантанированные и дают возможность работать на относительно больших плотностях тока при меньшем расходе вольфрама.

§ 12. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПЛАВЯЩИЕСЯ ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ СТАЛЕЙ

**Требования
к средне- и толстопокрытым электродам
и функции, выполняемые материалами
покрытия**

Плавящиеся электроды представляют собой металлический стержень, на поверхность которого окуна- нием или опрессовкой под давлением наносится покрытие определенных состава и толщины, которое при средне- и толстопокрытых электродах должно в основном обес- печить устойчивость горения дуги; получение металла шва требуемых химического состава и свойств; равномер- ное расплавление электродного стержня и покрытия;

Т а б л и ц а 7. Требования ГОСТов и ТУ к некоторым материалам

Материал	Массовое содержание							
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MoO	CaCO ₃
Гематит	6	92	1,7	—	—	—	—	—
Гранит	66—71	2—7	15—21	2—5	—	—	—	—
Кварцевый песок	97	—	—	—	—	—	—	—
Концентрат рутиловый	1,5	3	1,0	—	—	94	—	—
Мрамор	—	—	—	—	3	—	—	92
Магнезит	1,5	1,5	1,5	0,5	45	—	1,2	—
Марганцевая руда	10	—	3	—	—	—	—	—
Полевой шпат	64—70	1,5	17—21	1,5	0,5	—	1,0	—
Плавиковый шпат	5	—	—	—	—	—	—	—
Ферромарганец	—	—	—	—	—	—	—	—
Ферросилиций	—	—	—	—	—	—	—	—
Ферротитан	—	—	—	—	—	—	—	—
Мусковит H ₄ K ₂ Al ₆ Si ₆ O ₂₄	45—45	—	38	—	1,0	—	—	—
Крахмал	—	—	—	—	—	—	—	—
Оксицеллюлоза	—	—	—	—	—	—	—	—

высокую производительность при небольших потерях электродного материала на угар и разбрызгивание; плот- ные беспористые швы, не склонные к горячим трещинам; достаточную прочность покрытия и легкую отделяемость шлаковой корки от поверхности шва; минимальную ток- сичность при изготовлении и сварке.

Указанные требования обеспечиваются подбором соот- ветствующих материалов электродного стержня и по- крытия, в состав которых вводятся стабилизирующие, шлакообразующие, газообразующие, раскисляющие, ле- гирующие и другие вещества.

Стабилизирующие предназначены обеспечить устой- чивое горение дуги, что достигается введением в покрытие материалов, содержащих соединения щелочных и щелоч- ноземельных металлов K, Na, Ca, обладающих низким потенциалом ионизации. Такими материалами являются: поташ, кальцинированная сода, полевой шпат, мел, мрамор и др.

Шлакообразующие при расплавлении образуют шлак, который защищает капли электродного металла и свароч- ную ванну от атмосферного воздуха. К ним относятся:

электродных покрытий

соединений и элементов, %								
CaF	C	Si	Mn	Ti	S	P	Прочие примеси	ГОСТ или ТУ
					не более			
—	—	—	—	—	0,15	0,1	—	—
—	—	—	—	—	0,1	0,08	5—8 K ₂ O	ТУ ЦНИИТмаш
—	—	—	—	—	0,03	0,015	—	ГОСТ 4417—75
—	—	—	—	—	0,05	0,03	1 ZrO ₂	ГОСТ 22938—78
—	—	—	—	—	0,04	0,015	—	ГОСТ 4416—73
—	—	—	—	—	0,03	0,05	—	—
—	—	—	45	—	0,1	0,2	—	ГОСТ 4418—75
—	—	—	—	—	0,04	0,04	10 K ₂ O + +Na ₂ O	ГОСТ 4422—73
92	—	—	—	—	0,1	0,15	—	ГОСТ 4421—73
—	1,0	2,0	80	—	0,03	0,3	—	ГОСТ 4755—80
—	—	40—47	0,8	—	0,04	0,05	0,5 Cr	ГОСТ 1415—78
—	0,2	0,28	—	23	0,08	0,08	4,0 Cu; 0,4 Al	ГОСТ 4761—80
—	—	—	—	—	0,04	0,03	11 K ₂ O	ГОСТ 14327—82
—	—	—	—	—	—	—	—	ГОСТ 7699—78
—	—	—	—	—	—	—	—	ТУ 417—54

Таблица 8. Механические свойства металла шва, наплавленного металла сварного соединения и допустимое содержание серы и фосфора

Тип электрода	Механические свойства при нормальной температуре					Предельное массовое содержание в наплавленном металле, %					
	металла шва или наплавленного металла			сварного соединения, выполненного электродами диаметром менее 3 мм		S	P	Группы электродов по ГОСТ 9466—75			
	σ_B , МПа/мм ²	δ_5 , %	KCU , Дж/см ²	σ_B , МПа/мм ²	α , ...°						
не менее						1	2	3	1	2	3
Э-38	380	14	30	380	60	0,045	0,040	0,035	0,050	0,045	0,040
Э-42	420	18	80	420	150						
Э-46	460	18	80	460	150						
Э-50	500	16	70	500	120						
Э-42А	420	22	150	420	180	0,035	0,030	0,025	0,040	0,035	0,030
Э-46А	460	22	140	460	180						
Э-50А	500	20	130	500	150						
Э-55	550	20	120	550	150						
Э-60	600	18	100	600	120	0,035	0,030	0,025	0,040	0,035	0,035
Э-70	700	14	60	—	—						
Э-85	850	12	50	—	—						
Э-100	1000	10	50	—	—						
Э-125	1250	8	40	—	—	0,035	0,030	0,025	0,040	0,035	0,035
Э-150	1500	6	40	—	—						

Примечание. В зависимости от предельного содержания серы и фосфора проставляется соответствующий индекс в обозначении электрода (данные по содержанию серы и фосфора устанавливаются по паспорту или ТУ).

Примечание. В зависимости от предельного содержания серы и фосфора проставляется соответствующий индекс в обозначении электрода (данные по содержанию серы и фосфора устанавливаются по паспорту или ТУ).

марганцевая руда, гематит, гранит, мрамор, магнезит, кремнезем, полевой шпат, плавиковый шпат и др.

Газообразующие при нагревании разлагаются и образуют газы, которые оттесняют воздух от плавильной зоны и тем самым обеспечивают защиту расплавленного металла. Они вводятся в электродное покрытие в виде органических веществ (крахмал, декстрин, оксицеллюлоза, древесная мука) или минералов, которые, диссоциируя, образуют газы (мрамор, магнезит, доломит).

Раскисляющие — восстанавливающие часть металла, находящегося в расплаве в виде окислов. Достигается за счет элементов и компонентов, имеющих большее, чем железо, сродство к кислороду и другим элементам, окислы которых требуется удалить из металла шва. С этой целью в покрытие вводится ферромарганец, ферросилиций, ферротитан, реже ферроалюминий.

Легирующие — дополняющие металл шва элементами для придания ему повышенных прочности, износостойчивости, коррозионной стойкости и других специальных свойств.

В качестве легирующих элементов используются ферросплавы, иногда чистые металлы.

Связующие и цементирующие предназначены связать порошковые материалы покрытия в однородную, достаточно вязкую массу, и сцементировать покрытие на электродном стержне, с тем чтобы после высыхания оно имело нужную прочность. Чаще всего для этого используется натриевое жидкое стекло ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$), иногда калиевое ($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$). В покрытие еще вводятся пластикаторы, улучшающие формирование покрытия на стержне электрода, что особенно важно при прессовом изготовлении электродов. Для этого применяют бентонит, каолин, силикатную глыбу, декстрин. Некоторые материалы в покрытии выполняют одновременно несколько функций, например; мрамор является стабилизирующим шлакообразующим и газозащитным материалом, ферросплавы — раскисляющими и легирующими материалами.

Материалы, используемые для изготовления электродных покрытий, должны удовлетворять требованиям соответствующих ГОСТов и ТУ (табл. 7).

Таблица 9. Некоторые типы электродов для сварки теплоустой

Тип электрода	Массовое содержание элементов			
	C	Si	Mn	Cr
Э-09МХ	0,06—0,12	0,15—0,35	0,4—0,9	0,35—0,65
Э-10ХЗМ1БФ	0,07—0,12	0,15—0,45	0,5—0,9	2,40—3,00
Э-10Х5МФ	0,07—0,13	0,15—0,45	0,5—0,9	4,00—5,50

ГОСТы на электроды для сварки и наплавки сталей

Сейчас в СССР имеются четыре ГОСТа на металлические электроды для ручной дуговой сварки и наплавки сталей: ГОСТ 9466—75, ГОСТ 9467—75, ГОСТ 10051—75, ГОСТ 10052—75.

Классификация, общие технические требования, размеры, правила приемки, методы испытаний, требования к упаковке, маркировке, хранению, транспортировке определены в ГОСТ 9466—75. ГОСТ содержит указания по системе обозначения электродов для их опознания по ряду их характеристик, которые должны быть указаны на этикетках пачек, коробок или другой упаковочной тары, используемой для хранения и транспортировки электродов, а также при оформлении документации.

Требования к электродам для сварки металлических покрытий, электродам для ручной дуговой сварки углеродистых, низколегированных и легированных конструкционных и легированных теплоустойчивых сталей установлены по механическим свойствам наплавлен-

чивых сталей по ГОСТ 9467—75

в наплавленном металле, %					Механические свойства наплавленного металла при нормальной температуре		
Mo	V	Nb	S	P	σ_B , МПа/мм ²	δ_B , %	KCU, Дж/см ²
			не более		не менее		
0,35—0,65	—	—	0,025	0,035	460	18	90
0,70—1,00	0,25—0,50	0,35—0,60	0,025	0,030	550	14	60
0,35—0,65	0,10—0,35	—	0,025	0,035	550	14	60

ного металла и содержанию в нем серы и фосфора (ГОСТ 9467—75).

Типы этих электродов обозначаются буквой Э, затем следуют цифры, характеризующие минимально гарантируемое временное сопротивление наплавленного металла электродами данного типа. Например, обозначение Э-42 означает тип электрода по ГОСТ 9467—75 с минимальным временным сопротивлением 420 МПа/мм².

Если в обозначении после цифр стоит буква А, то это означает, что электрод данного типа обеспечивает более высокие пластические свойства наплавленного металла по сравнению с электродами соответствующего типа без этой буквы. Для сварки вышеуказанных сталей предусмотрены 14 типов электродов, требования к которым по механическим свойствам и содержанию серы и фосфора приведены в табл. 8. Данные по содержанию серы и фосфора распределены по группам таблицы и служат для индексации при условном обозначении электродов.

Электроды для сварки теплоустойчивых сталей по ГОСТ 9467—75 классифицируются по химическому составу и механическим свойствам наплавленного металла.

Таблица 10. Некоторые типы электродов для сварки высоколегированных сталей по ГОСТ 10052—75

Тип электродов	Массовое содержание элементов в наплавленном металле %										Механические свойства металла шва и наплавленного металла		
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Прочие элементы	S	P	не более	σ _т , МПа	δ ₅ , %
Э-12Х13	0,08—0,16	0,30—1,00	0,50—1,50	11,0—14,0	До 0,60	—	—	—	0,030	0,035	не менее	600	16
Э-08Х24Н6ТАФМ	До 0,10	До 0,70	До 1,20	22,00—26,00	5,00—6,50	0,05—0,10	0,05—0,15	0,02—0,08 Ti до 0,20 N	0,020	0,033	не менее	700	15
Э-04Х20Н9	До 0,06	0,30—1,20	1,00—2,00	18,00—22,50	7,50—10,10	—	—	—	0,018	0,030	не менее	550	30
Э-02Х20Н14Г2М2	До 0,03	До 1,00	1,00—2,50	17,50—22,50	13,00—15,50	1,80—3,20	—	—	0,020	0,025	не менее	550	25
Э-02Х20Н60М15В3	До 0,04	До 0,08	До 1,00	17,00—22,00	Основа	13,50—16,50	—	2,50—4,20 W до 3,00 Fe	0,020	0,025	не менее	700	15

Типы маркируются буквой Э и другими буквами и цифрами, характеризующими химический состав наплавленного металла. В табл. 9 приведены требования ГОСТа к некоторым типам электродов для сварки теплоустойчивых сталей.

Требования к электродам для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами и распространяются на электроды для ручной дуговой сварки коррозионно-стойких, жаропрочных и жаростойких высоколегированных сталей мартенситного, мартенситно-ферритного, ферритного, аустенитно-ферритного, аустенитно-мартенситного и аустенитного классов устанавливает ГОСТ 10052—75.

Типы этих электродов обозначаются буквой Э, затем следуют две цифры, указывающие среднее содержание углерода в сотых долях процента, после чего буквами и цифрами обозначаются, по принятой системе маркировки сталей, содержания элементов в наплавленном металле. Предусмотрено всего 49 типов электродов. В табл. 10 приведены требования ГОСТа к некоторым типам электродов.

Требования на покрытые металлические электроды для ручной дуговой наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами устанавливает ГОСТ 10051—75, который не распространяется на электроды для наплавки слоев из цветных металлов.

Тип электродов обозначается буквой Э, затем следуют цифры, характеризующие среднее содержание углерода в наплавленном металле в сотых долях процента и обозначение легирующих элементов по принятой системе маркировки сталей. Предусмотрено 44 типа электродов и регламентируют их по химическому составу наплавленного металла и его твердости при нормальной температуре. Данные по некоторым типам электродов по ГОСТ 10051—75 приведены в табл. 11. Содержание серы и фосфора в указанной таблице распределены по группам и служат для индексации при условном обозначении электродов.

Наряду с типами электродов, определяемыми по ГОСТам, различают еще электроды по маркам, которые указаны в паспорте. Одному типу электродов по ГОСТу могут соответствовать несколько марок. Например, электродам типа Э-46 соответствуют марки АНО-4с, МР-3 и др. Некоторые данные из паспорта на электроды марки АНО-4с приведены по форме 1.

Некоторые данные из паспорта на электроды марки АНО-4с типа Э-46

Тип электрода по ГОСТ 9467—75	Марка			Цвет окраски торцов						
	электрода	сварочной проволоки	покрытия							
Э-46А	АНО-4	Св-08 (ГОСТ 2246—70)	АНО-4							
Область применения										
По маркам сталей	По назначению конструкции			По видам соединения						
Ст3, Ст4 и аналогичные	Сварка ответственных конструкций из низкоуглеродистых сталей			Для всех видов соединений						
Массовая доля элементов в проволоке, %										
C	Mn	Si	Cr	N	S	P	Рекомендуемые диаметр (мм) и ток (А)			
Не более 0,10	0,35—0,60	0,03	0,15	0,30	0,04	0,04	100—140	170—200	190—270	270—330
							3	4	5	6

Продолжение формы 1

Характеристика электродного покрытия														
Состав покрытия		Массовое содержание, %	Диаметр электродного стержня, мм				3	4	5	6				
Рутитовый концентрат Мушкет Магнезит кристаллический Ферромарганец Целлюлоза Смесь натриевого (70 %) и калиевого (30 %) жидкого стекла		44,0 24,0 15,0 15,0 2,0 23—25	Толщина покрытия электрода, мм				0,9—1,0	1,1—1,3	1,3—1,5	1,7—1,9				
			Род тока				Переменный и постоянный Любая Любое							
			Полярность											
			Пространственное положение шва											
			Коэффициент наплавки, г/(А·ч)								8,0—8,3 1,7			
Массовый расход электрода на 1 кг наплавленного металла, кг														
Коэффициент массы покрытия, %				35—40										
Средний химический состав наплавленного металла, %						Механические свойства								
C	Mn	Si	S		P	сварного шва		сварного соединения						
			не более	σ _в , МПа/мм ²		δ, %	KCU, Дж/см ²	σ _т , МПа/мм ²	α, ...°					
										не менее				
0,06—0,10	0,6—0,8	0,08—0,14	0,04	0,04		460	22	140	380	150				

Примечание. Разрывные образцы перед механическим испытанием подвергаются подогреву до T = 250 °C в течение 6 ч для удаления диффундирующего водорода.

Примечание. Разрывные образцы перед механическим испытанием подвергаются подогреву до $T = 250^\circ\text{C}$ в течение 6 ч для удаления диффундирующего водорода.

Таблица 11. Некоторые типы электродов для наплавки поверх

Тип электрода	Массовое содержание					
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
Э-11ГЗ	0,08—0,13	До 0,15	2,8—4,0	—	—	—
Э-15Г5	0,12—0,18	До 0,15	4,1—5,2	—	—	—
Э-70ХЗСМТ	0,50—0,90	0,80—1,20	0,40—1,0	2,3—3,2	—	0,3—0,7
Э-350Х26Г2Р2СТ	3,10—3,90	0,60—1,20	1,5—2,5	23,0—29,0	—	—
Э-09Х31Н8АМ2	0,06—0,12	До 0,5	До 0,5	30,0—33,0	7,0—9,0	1,8—2,4
Э-90В10Х5Ф2	0,8—1,0	До 0,4	До 0,4	4,0—5,0	—	—
Э-10К15В7М5Х3СФ	0,08—0,12	0,80—1,6	0,3—0,7	2,0—4,2	—	3,8—6,2
Э-190К62Х29В5С2	1,6—2,20	1,5—2,60	—	26,0—32,0	—	—

Система условного обозначения металлических электродов для ручной дуговой сварки и наплавки

Структурная схема условного обозначения электродов приведена на рис. 44 (ГОСТ 9466—75). Рассмотрим обозначение каждого пункта структурной схемы.

1. Тип электрода устанавливается по соответствующим стандартам.
2. Марка электрода — по паспорту или ТУ.
3. Диаметр электрода — по паспорту или ТУ.

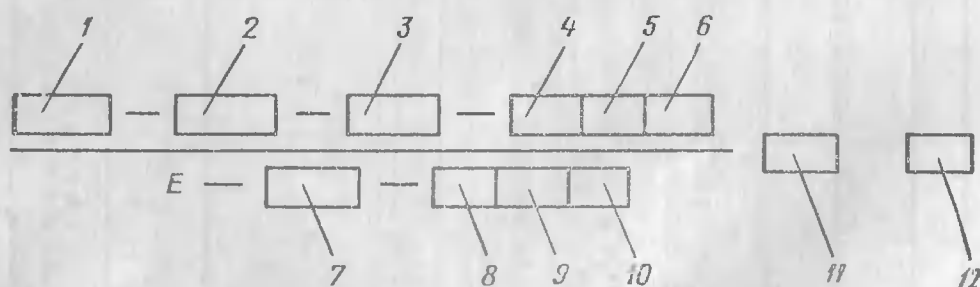


Рис. 44. Схема условного обозначения электродов

ностных слоев с особыми свойствами по ГОСТ 10051—75

элементов, %								Твердость после сварки	
W	V	Ti	Прочие элементы	S		P		Без терми- ческой об- работки	После тер- мической обработки
				Группа электродов по ГОСТ 9466—75					
				1 и 2	3	1 и 2	3		
—	—	—	—	0,030	0,020	0,040	0,035	28—35	—
—	—	—	—	0,030	0,020	0,040	0,035	35—40	—
—	—	До 0,30	—	0,030	0,020	0,035	0,030		52—60
—	—	0,2— 0,4	1,8—2,5 B	0,035	0,025	0,040	0,035	58—63	—
—	—	—	0,3—0,4 N	0,030	0,020	0,035	0,030	—	40—48
8,5— 10,5	2,0— 2,6	—	—	0,035	0,025	0,040	0,035	—	57—62
5,0— 8,0	0,5— 1,1	—	12,7— 16,3 Co	0,030	0,020	0,035	0,030	—	52—58
4,0— 5,0	—	—	59,0— 65,0 Co	0,035	0,025	0,040	0,035	40—50	—

4. Назначение — в соответствии с принятым подразделением свариваемых сталей: 1) для сварки углеродистых и низколегированных сталей с $\sigma_B \leq 600$ МПа/мм² буквой У; 2) для сварки легированных конструкционных сталей с $\sigma_B \geq 600$ МПа/мм² — Л; 3) для сварки легированных теплоустойчивых сталей — Т; 4) для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами — В; 5) для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами — Н.

5. Толщина покрытия — в зависимости от отношения диаметра покрытого электрода D к диаметру электродного стержня d электроды различаются: с тонким покрытием ($D \leq 1,20$) — М; со средним покрытием ($1,20 \leq D/d \leq 1,45$) — С; с толстым покрытием ($1,45 < D/d \leq 1,80$) — Д; с особо толстым покрытием ($D/d > 1,80$) — Г.

6. Группы по качеству устанавливаются только в зависимости от содержания серы и фосфора в наплавленном металле: для электродов Э-38 — Э-150 по ГОСТ 9467—75 (см. табл. 8), а для некоторых типов электродов по ГОСТ 10051—75 (см. табл. 11), где электроды по этому признаку разделены на три группы.

7. Группа индексов, характеризующих наплавленный металл и металл шва по временному сопротивлению, относительному удлинению и минимальной температуре, при которой KCU составляет не менее 35 Дж/см², только для электродов типа Э-38—Э-60 по ГОСТ 9467—75 приведен в табл. 12.

8. Обозначение вида покрытия. Различают следующие виды покрытий: кислое — А; основное — Б; целлюлозное — Ц; рутиловое — Р; смешанное покрытие — соответствующее двойное обозначение; прочие виды покрытий — П.

Если в составе покрытия содержится более 20 % железного порошка, то вид покрытия дополняется буквой Ж.

9. В зависимости от допустимых пространственных положений сварки или наплавки электроды подразделяются и обозначаются: для всех пространственных положений — 1; для всех положений, кроме вертикального сверху вниз — 2; для нижнего, горизонтального и вертикального снизу вверх — 3; для нижнего и нижнего «в лодочку» — 4.

10. По роду тока, полярности, номинальному напряжению холостого хода, используемого источника питания сварочной дуги переменного тока частотой 50 Гц электроды подразделяются и обозначаются в соответствии с табл. 13.

11. Номер ГОСТ 9466—75, определяющий классификацию, размеры и общие технические требования на покрытые металлические электроды для ручной дуговой сварки.

12. Номера ГОСТов, регламентирующих требования к рассматриваемому типу электродов (ГОСТ 9467—75, ГОСТ 10051—75 или ГОСТ 10052—75).

В условном обозначении электродов (см. рис. 44) с временным сопротивлением до 600 МПа/мм² после буквы E тире не ставится.

Пример 1. Выполним условное обозначение электродов с $\sigma_B \leq 600$ МПа/мм², например типа Э-46А по ГОСТ 9467—75. Этому типу электродов, в частности, соответствуют по паспорту электроды марки УОНИ-13/45.

Полагаем, что электроды имеют диаметр 3 мм. Согласно паспорту на эти электроды они предназначены для сварки углеродистых и низколегированных сталей и соответственно п. 4 схемы их следует обозначать буквой У. Покрытие среднее и по п. 5 схемы обозначаются буквой С.

Группу по качеству, по содержанию серы и фосфора в наплавленном металле, устанавливаем по паспорту на электроды УОНИ-13/45, где содержание серы в наплавленном металле допускается до 0,04 %, а фосфора — до 0,045 % и определяем индекс по табл. 8 для электро-

Таблица 12. Группа индексов условного обозначения электродов для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с временным сопротивлением наплавленного металла до 600 МПа/мм²

Группа индексов	Минимальное значение показателей механических свойств наплавленного металла и металла шва при нормальной температуре		Минимальная температура T_x (°C), при которой ударная вязкость металла шва и наплавленного металла, KCU составляют не менее 35 Дж/см ²
	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа/мм ²	Относительное удлинение δ_5 , %	
37 0	370	При любом значении	При любом значении
41 0	410	Менее 20	Не регламентирована
41 1	410	20	+20
41 2	410	22	0
41 3	410	24	—20
41 4	410	24	—30
41 5	410	24	—40
41 6	410	24	—50
41 7	410	24	—60
43 0	430	Менее 20	Не регламентирована
43 1	430	20	+20
43 2	430	22	0
43 3	430	24	—20
43 4	430	24	—30
43 5	430	24	—40
43 6	430	24	—50
43 7	430	24	—60
51 0	510	Менее 18	Не регламентирована
51 1	510	18	+20
51 2	510	18	0
51 3	510	18	—20
51 4	510	20	—30
51 5	510	20	—40
51 6	510	20	—50
51 7	510	20	—60

Примечание. В группе индексов первые два индекса характеризуют минимальное значение временного сопротивления σ_B , а третий индекс характеризует одновременно минимальные значения показателей δ_5 и T_x .
Если показатели δ_5 и T_x согласно таблице соответствуют различным индексам, третий индекс устанавливается по минимальному значению показателя δ_5 и в группу индексов вводится в скобках четвертый дополнительный индекс, характеризующий показатель T_x .

дов типа Э-46. По содержанию серы и фосфора электроды относятся к 2-й группе и обозначаются цифрой 2.

Индексы по п. 7, характеризующие наплавленный металл и металл шва, устанавливаем по паспорту, в соответствии с которым электроды марки УОНИ-13/45 имеют минимальное временное сопротивление 430 МПа/мм², что по табл. 12

Таблица 13. Обозначение электродов в зависимости от тока, полярности и номинального напряжения холостого хода источника питания

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

* Цифрой 0 обозначают электроды для сварки или наплавки только на постоянном токе обратной полярности.

Условное обозначение электродов типа Э-46А марки УОНИ-13/45 имеет вид

Э-46А — УОНИ-13/45 — 3,0 — УС2 ГОСТ 9466 — 75,
Е432 (5) — В10
ГОСТ 9467—75,

а в технической документации УОНИ-13/45—3,02 — ГОСТ 9466—75.

Наряду с тонкопокрытыми электродами, предусмотренными ГОСТом, временное сопротивление наплавленного металла которых должно быть не менее 380 МПа/мм², в практике иногда применяют электроды со стабилизирующим покрытием.

Такие покрытия наносят на электродные стержни тонким слоем и масса покрытия составляет обычно 1—2 % от массы стержня. Механические свойства металла шва, сваренного электродами со стабилизирующими покрытиями, низкие и практически не отличаются от свойств металла шва, сваренного голой проволокой. Поэтому эти электроды применяют редко, в основном для сварки ответственных изделий.

Условное обозначение электродов для сварки легированных конструкционных сталей с $\sigma_b \geq 600$ МПа/мм² и легированных теплоустойчивых сталей

Условные обозначения этих электродов будут отличаться от ранее рассмотренного (см. рис. 44, поз. 7), характеризующего наплавленный металл и металл шва.

1. В обозначении электродов для сварки легированных конструкционных сталей с $\sigma_b \geq 600$ МПа/мм² п. 7 схемы должны иметь три индекса.

Первый индекс — двузначное число, соответствующее среднему содержанию углерода в сотых долях процента (по паспорту).

Второй индекс — обозначение химического состава наплавленного металла по принятой системе маркировки сталей. Буквой — соответствующий элемент, и цифрами, показывающими среднее содержание этого элемента в наплавленном металле в процентах (с погрешностью до 1 %). Эти два индекса устанавливаются по паспортам или ТУ на электроды.

Третий индекс, характеризующий минимальную температуру, при которой ударная вязкость металла шва наплавленного металла составляет не менее 35 Дж/см², устанавливается:

Минимальная температура (°С), при которой ударная вязкость KCU составляет не менее 35 Дж/см ²	Индекс
Не регламентируется	0
+20	1
0	2

—20	3
—30	4
—40	5
—50	6
—60	7

2. В обозначении электродов для сварки легированных теплоустойчивых сталей п. 7 должен иметь два индекса.

Первый индекс аналогичен третьему индексу для легированных конструкционных сталей с $\sigma_b > 600$ МПа/мм².

Второй индекс, характеризующий максимальную рабочую температуру, при которой регламентированы показатели длительной прочности наплавленного металла и металла шва, устанавливается по паспорту или ТУ:

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

Условное обозначение электродов для дуговой сварки высоколегированных сталей (ГОСТ 10052—75)

Обозначение таких электродов отличается только группой индексов, характеризующих наплавленный металл и металл шва (п. 7 схемы). Эта группа должна состоять из четырех индексов.

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

Наплавленный металл и металл шва не склонны к межкристаллитной коррозии при испытании по ГОСТ 6032—58	Индекс
Данные отсутствуют	0
По методу А	1
» » АМ	2
» » Б	3
» » В	4
» » Д	5

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

Максимальная рабочая температура °С, при которой регламентированы показатели длительной прочности наплавленного металла и металла шва	Индекс
Данные отсутствуют	0
До 500	1
510—550	2
560—660	3
610—650	4
660—700	5
710—750	6
760—800	7
810—850	8
Св. 850	9

Третий индекс характеризует максимальную рабочую температуру сварных соединений, при которой допускается применение электродов для сварки жаростойких сталей:

Максимальная рабочая температура °С сварных соединений, при которой допускается применение электродов для сварки жаростойких сталей	Индекс
Данные отсутствуют	0
До 600	1
610—650	2
660—700	3
710—750	4
760—800	5
810—900	6
910—1000	7
1010—1100	8
Св. 1100	9

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

Массовое содержание ферритной фазы в наплавленном металле, %	Индекс
Не нормируется	0
0,5—4,0	1
2,0—4,0	2
2,0—5,5	3
2,0—8,0	4
2,0—10,0	5

4,0 — 10,0	6
5,0 — 15,0	7
10,0 — 20,0	8

Все данные, необходимые для составления группы индексов по поз. 7 рис. 44 должны быть взяты из паспортов или ТУ на электроды конкретных марок.

Пример 2. Составить группу индексов, учитывающих характеристики наплавленного металла и металла шва, для условного обозначения электродов марки ЦЛ-9 (типа Э-10Х25Н13Г2Б).

По паспорту наплавленный металл и металл шва не склонны к межкристаллитной коррозии при испытании по методу АМ, что соответствует индексу 2 (см. с. 98).

Данные по длительной прочности на эти электроды в паспорте отсутствуют, что соответствует индексу 0 (см. с. 99).

Эти электроды могут быть применены для выполнения сварных соединений жаропрочных сталей, работающих при температуре до 1000°С, что соответствует индексу 7 (см. с. 99).

Содержание ферритной фазы в наплавленном металле 3,0—10,0 %, что соответствует индексу 5 (см. с. 99) и группа индексов п. 7 примет вид 2075.

Условное обозначение электродов марки ЦЛ-9, диаметром 5,0 мм будет иметь следующий вид:

Э-10Х25Н13Г2Б — ЦЛ-9 — 5,0 — ВД1
Е — 2075 — Б — 30

ГОСТ 9466 — 75,

ГОСТ 10052 — 75,

а в технической документации ЦЛ-9—5,00—1—ГОСТ 9466—75.

Условное обозначение электродов по ГОСТ 10051—75 для дуговой наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами

Оно отличается от ранее рассмотренной схемы, только группой индексов, указывающих характеристики наплавленного металла п. 7 и эта группа должна состоять из двух индексов.

Первый индекс указывает среднюю твердость наплавленного металла табл. 14. Индекс фиксируется двумя показателями твердости, по Виккерсу слева от косой черты, по Роквеллу справа от косой черты.

Второй индекс указывает, подвергался ли наплавленный металл до испытания термической обработке.

Если твердость обеспечивается без термической обработки после наплавки, то проставляется индекс 1, если после термической обработки, то проставляется индекс 2.

Таблица 14. Индексация электродов, регламентированных ГОСТ 10051—75, применяемых для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами, в зависимости от твердости

Твердость		Индекс	Твердость		Индекс
HV	HRC ₃		HV	HRC ₃	
175—224	13—21	200/17	675—724	58	700/58
225—274	22—28	250/25	725—774	59—60	725/60
275—324	29—35	300/32	775—824	61	800/61
325—374	26—38	350/37	825—874	62—63	852/62
375—424	39—43	400/41	875—924	64	900/64
425—474	44—47	450/45	925—974	65	950/65
475—524	48	500/58	975—1024	66—67	1000/66
525—574	49—51	550/50	1025—1074	68	1050/68
575—624	52—54	600/53	1075—1124	69	1100/69
625—674	55—57	650/56	1125—1175	70—71	1150/70

В тех случаях, когда в паспорте или ТУ приводятся данные по твердости металла как без термической обработки после наплавки, так и после термической обработки (или после термической обработки) по разным режимам, то группа индексов п. 7 дополняется соответствующими парами индексов, указываемыми в скобках.

Данные, необходимые для составления групп индексов по п. 7, должны быть взяты по паспорту или ТУ на электроды конкретных марок для некоторых типов электродов по табл. 11.

Пример 3. Составить группу индексов, указывающих характеристики наплавленного металла (п. 7 схемы), для условного обозначения электродов марки 12АН/ЛИВТ типа Э-Х7Г2С.

По паспорту устанавливаем среднюю твердость наплавленного металла: 32 HRC, 300 HV. Тогда первый индекс согласно табл. 14 следует обозначать 300/32.

Второй индекс, учитывая, что твердость обеспечивается без термической обработки после наплавки, обозначается 1, и группа индексов п. 7 примет вид 300/32—1.

Существует шесть видов электродных покрытий. Рассмотрим особенности кислого, основного целлюлозного и рутилового (ГОСТ 9466—75).

Кислое покрытие обозначается буквой А и свидетельствует, что в составе этих покрытий имеется значительное количество материалов рудного происхождения (например, электроды марки ЦМ-7), содержащих кислые компоненты: марганцевая руда, гематит, кремнезем и большое

количество ферромарганца, необходимого для раскисления металла шва и увеличения производительности за счет железа, переходящего из покрытия в металл шва. Газовая защита обеспечивается разложением под действием теплоты дуги органических составляющих покрытия. Сварку электродами с этим видом покрытия можно производить на постоянном и переменном токе, а при коэффициенте покрытия (отношение массы покрытия к массе покрытой части стержня) до 0,4 возможна сварка во всех пространственных положениях. В процессе сварки этими электродами сварочная ванна бурно кипит вследствие активного раскисления металла сварочной ванны углеродом, что способствует хорошей дегазации металла шва, поэтому даже при сварке по окалине или ржавчине получаются плотные швы.

Недостатками кислых покрытий электродов являются:

- 1) склонность металла шва к образованию кристаллизационных трещин;
- 2) повышенное разбрызгивание металла;
- 3) значительное выделение в процессе сварки вредных марганцевых соединений.

Основное покрытие обозначается буквой Б. Это покрытие содержит: карбонат кальция, карбонат магния, плавиковый шпат, ферросплавы и некоторое количество кремнезема. Газовая защита расплавленного металла обеспечивается углекислым газом и окисью углерода, образующимися вследствие диссоциации карбонатов (например, электроды марки УОНИ-13/45).

Электроды с покрытием этого вида применяются в основном для сварки на постоянном токе обратной полярности. Чтобы использовать электроды этого вида для сварки на переменном токе, в покрытие вводят материалы, содержащие легко ионизирующие элементы: калиевое жидкое стекло, поташ, кальцинированную соду и др.

Металл, наплавленный электродами с основным покрытием, обладает минимальным содержанием кислорода и азота, хорошей стойкостью против образования кристаллизационных трещин и старения, высокими показателями ударной вязкости как при положительных, так и отрицательных температурах. Поэтому эти электроды предназначаются для сварки конструкций из углеродистых и конструкционных сталей, жестких конструкций из литых углеродистых и низколегированных высокопрочных сталей.

Недостатком этого вида покрытий электродов является повышенная чувствительность к порообразованию при увлажнении покрытия, удлинении дуги и при наличии окалины, ржавчины или масла на кромках свариваемых деталей.

Целлюлозное покрытие обозначается буквой Ц. Оно содержит преимущественно материалы органического происхождения (крахмал, декстрин, целлюлозу, древесную муку), которые, разлагаясь под действием теплоты дуги, обеспечивают интенсивную газовую защиту расплавленного металла.

Шлакообразующим в данном покрытии служит титановый концентрат, рутил, раскислителем — ферромарганец, (например, электроды марки ВСЦ-4).

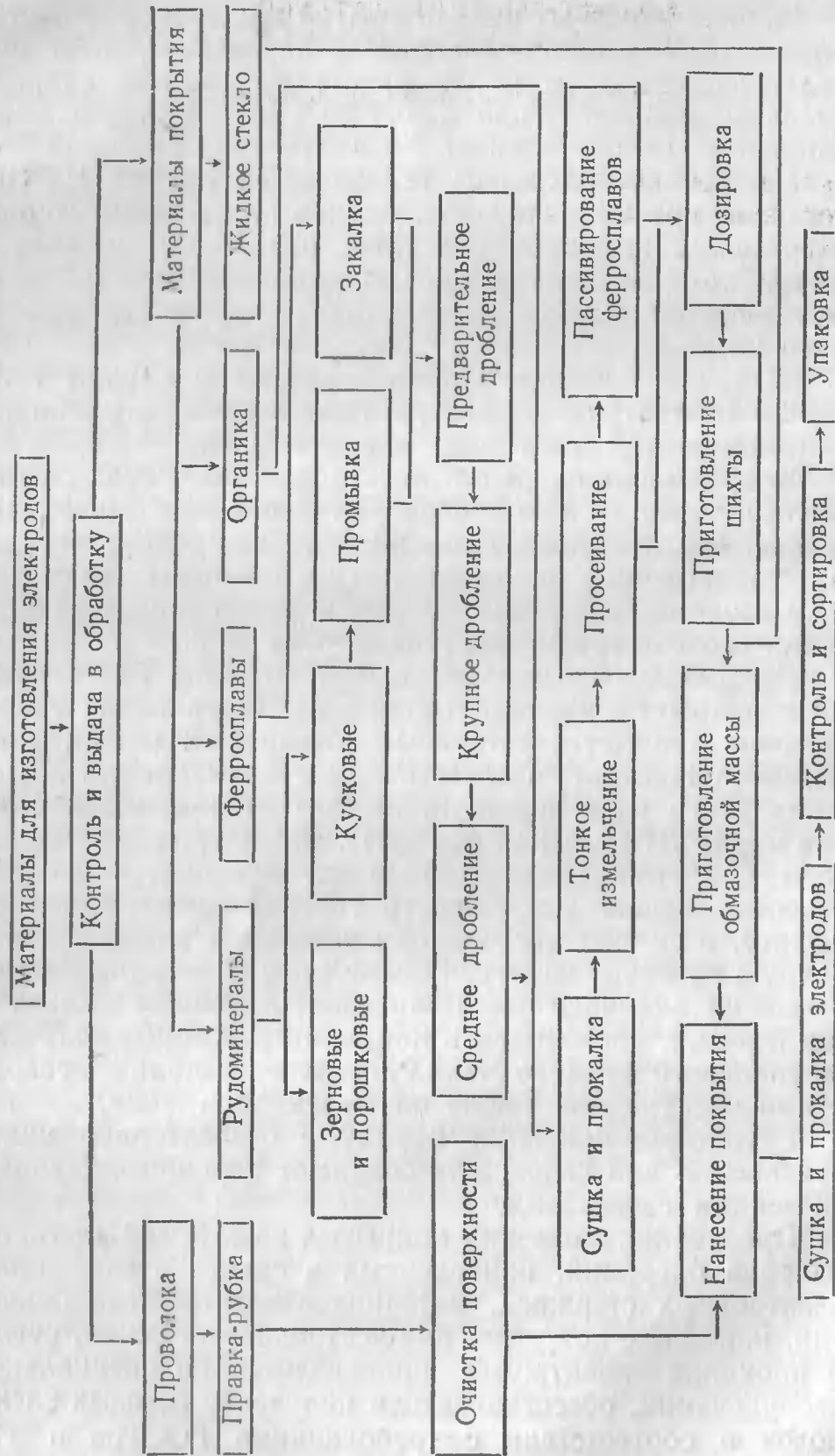
Коэффициент покрытия электродов этого вида составляет 0,12—0,15, и они образуют небольшое количество шлака, что позволяет применять их для сварки во всех пространственных положениях. Они пригодны для сварки на постоянном и переменном токе и по механическим свойствам соответствуют электродам типа Э-42.

Рутиловое покрытие обозначается буквой Т. В составе этих покрытий имеются материалы, содержащие значительное количество титановых соединений: рутил, титановый концентрат, ильменит и др. Типичным представителем этого вида покрытия является покрытие электродов марки АНО-4с (см. форму 1). Это покрытие содержит минералы: рутиловый концентрат, мусковит, магнезит, обеспечивающие устойчивость горения дуги, шлаковую защиту, а за счет диссоциации некоторых элементов частичную газовую защиту. Раскисление и легирование достигается наличием ферромарганца, а газовая защита — целлюлозой. Имеющееся в покрытии некоторое количество калиевого жидкого стекла позволяет выполнять сварку этими электродами также на переменном токе.

Рутиловые покрытия наряду с относительно малой вредностью для сварщиков обладают хорошими технологическими свойствами.

Процесс изготовления покрытых электродов складывается из ряда операций, приведенных в схеме 2. Подготовка электродных стержней, материалов электродных покрытий, нанесение покрытия на электродные стержни, сушка и прокатка электродов производятся на специальном оборудовании, обеспечивающем получение готовых электродов в соответствии с требованиями ГОСТов и ТУ.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОКРЫТЫХ ЭЛЕКТРОДОВ



§ 13. ФЛЮСЫ ДЛЯ ДУГОВОЙ И ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ

Требования к флюсам и их классификация

Флюсы, применяемые при электрической сварке, в основном должны обеспечить защиту зоны сварки от атмосферного воздуха, устойчивость горения дуги, хорошее формирование металла шва, плотные швы, не склонные к кристаллизационным трещинам, легкую отделяемость шлаковой корки после остывания, наименьшее выделение пыли и вредных для здоровья сварщика газов, а также ряд дополнительных требований, возникающих при использовании флюсов для различных металлов.

Флюсы классифицируют по назначению, химическому составу, химическим свойствам, степени легирования металла шва, способу изготовления, строению частиц, зависимости вязкости шлака от температуры.

По назначению в зависимости от их преимущественного применения флюсы делятся на три группы: 1) для сварки углеродистых и легированных сталей; 2) для сварки высоколегированных сталей; 3) для сварки цветных металлов и сплавов. В отдельных случаях флюсы, предназначенные для сварки металлов одной группы, могут быть применены для сварки металлов другой группы.

По химическому составу в зависимости от входящих в них компонентов различают флюсы оксидные, солевые и солеоксидные.

Оксидные флюсы состоят из оксидов металлов и могут содержать до 10 % фтористых соединений. Их применяют для сварки углеродистых и низколегированных сталей.

Солевые флюсы состоят из фтористых и хлористых солей металлов и других не содержащих кислород химических соединений. Они используются для сварки активных металлов и шлакового переплава.

Солеоксидные флюсы состоят из фторидов и оксидов металлов, применяются для сварки легированных сталей.

По химическим свойствам оксидные флюсы в зависимости от соотношения масс, входящих в них кислых и основных оксидов подразделяются на кислые, основные и нейтральные. К кислым оксидам относятся SiO_2 и TiO_2 , к основным — CaO , MgO , MnO , FeO . Фториды и хлориды относятся к химически нейтральным соединениям.

Флюсы в зависимости от содержания в них SiO_2 , MnO различают высококремнистые (свыше 37—40 % SiO_2),

низкремнистые (до 35 % SiO_2) и безкремнистые (в качестве примесей не более 4 % SiO_2), безмарганцевые (не более 1,0 % MnO), марганцевые (более 1,0 % MnO).

По степени легирования металла шва различают флюсы пассивные, практически не вступающие во взаимодействие с расплавленным металлом; активные, которые могут быть слабо легирующими (например, плавные флюсы), и сильно легирующими — большинство керамических флюсов.

По способу изготовления флюсы делятся на плавные и неплавные.

Плавные флюсы, на которые распространяется ГОСТ 9087—81, получают путем сплавления в электрических и пламенных печах шихты определенного состава с последующей их обработкой для получения крупинки требуемого размера. Неплавные флюсы изготавливаются без расплавления шихты. К ним относятся:

1) флюсы, получаемые путем измельчения минералов, как, например, флюс БКФ-1, состоящий только из крупинки плавикового шпата;

2) путем смешивания крупинки нескольких материалов. Эти флюсы просты в изготовлении, но в связи с наличием в таком флюсе материалов с различной удельной плотностью при транспортировке и в процессе сварки происходит их сепарация, что меняет степень легирования отдельных участков наплавки или шва, а это крайне нежелательно;

3) керамические флюсы, предложенные акад. К. К. Хреновым, представляют собой механическую смесь тонкоизмельченных природных минералов, ферросплавов и искусственных силикатов, цементированных жидким стеклом и гранулируемых на крупинки определенных размеров. Керамические флюсы, шихтуемые из фтористых и хлористых солей, обладают свойствами самоспекания и изготавливаются без цементирующей добавки (жидкого стекла).

По строению крупинки (зерен) флюсы делятся на стекловидные, пензвидные и цементированные.

Стекловидный плавный флюс представляет собой прозрачные зерна, окрашенные в зависимости от состава флюса в различные тона: от светло-синего до темно-бурого. Для получения его жидкий флюс при температуре 1200—1250 °С тонкой струей льют в бак с проточной водой. Плотность такого флюса 1,2—1,6 г/см³.

Пензвидный плавный флюс представляет собой крупинки пензистого материала различных оттенков. Для получения его расплав, нагретый до 1550—1600 °С, выливают в воду. При этом пары воды вспенивают расплавленную массу, образуя пензвидный флюс, плотность которого менее 1,0 г/см³.

Стекловидный флюс обеспечивает лучшую, чем пензвидный, защиту зоны сварки. Но более качественное формирование шва наблюдается при пензвидном флюсе. Цементированный флюс — это неплавный керамический флюс, состоящий из порошковых материалов, цементированных обычно жидким стеклом и обработанных для получения крупинки определенных размеров.

По характеру зависимости вязкости шлаков от температуры различают флюсы, образующие шлаки с различными физическими свойствами (рис. 45).

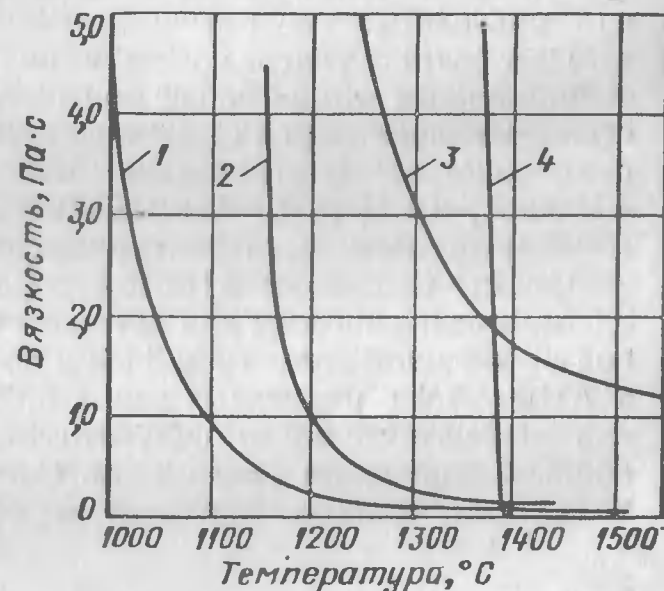


Рис. 45. Изменение вязкости флюсов в зависимости от температуры:

1 — флюс АН-8; 2 — флюс АН-348А; 3 — флюс АШ; 4 — плавиковый шпат

Флюсы, вязкость шлаков которых с понижением температуры возрастает медленно, называют длинными. А флюсы, вязкость шлаков которых с понижением температуры возрастает быстро, называют короткими. Это свойство флюсов существенно влияет на формирование шва. Преимущественно находят применение флюсы с короткими шлаками, какими являются основные флюсы.

Характеристика и область применения наиболее распространенных флюсов

При сварке под флюсом состав флюса полностью определяет состав шлака и атмосферу дуги, а взаимодействие жидкого шлака с расплавленным металлом сварочной ванны оказывает существенное влияние на химический состав, структуру и свойства шва.

Применительно к углеродистым сталям качественный шов можно получить при следующем сочетании флюсов и сварочной проволоки:

1) плавленный марганцевый, высококремнистый флюс и низкоуглеродистая или марганцевая проволока;

2) плавленный безмарганцевый, высококремнистый флюс и низкоуглеродистая марганцовистая сварочная проволока;

3) керамический флюс и низкоуглеродистая сварочная проволока.

При сварке углеродистых и низколегированных конструкционных сталей чаще всего используется углеродистая проволока марок Св-08 и Св-08А в сочетании с высококремнистым марганцевым флюсом марок ОСЦ-45, АН-348А, ОСЦ-45М, АН-348АМ (мелкий). Требования к этим флюсам регламентируются ГОСТ 9087—81.

Флюсы ОСЦ-45 и АН-348А с размером зерна 0,35—3,0 мм предназначены для автоматической сварки сварочной проволокой диаметром 3 мм и более. Флюсы ОСЦ-45М и АН-348АМ с размерами зерна 0,25—1,6 мм применяют для автоматической и полуавтоматической сварки проволокой диаметром менее 3 мм. Состав некоторых марок плавленных флюсов приведен в табл. 15.

Таблица 15. Состав некоторых марок плавленных флюсов для

Марка флюса	Массовое содержание			
	SiO ₂	MnO	CaF ₂	MgO
Сварка углеро				
ОСЦ-45	38,0—44,0	38,0—44,0	6,0—9,0	До 2,5
АН-348А	41,0—34,0	34,0—38,0	4,0—5,5	5,0—7,5
ОСЦ-45М	38,0—44,0	38,0—44,0	6,0—9,0	До 2,5
АН-348АМ	41,0—44,0	34,0—38,0	3,5—4,5	5,0—7,5
ФЦ-9	39,5	40,0	2,6	До 1,0
АН-8	34,5	23,5	16,0	6,0
Сварка легиро				
АН-22	18,0—21,5	7,0—9,0	20,0—24,0	11,5—15,0
АН-26С	29,0—33,0	2,5—4,0	20,0—24,0	15,0—18,0
48-ОФ-6	9,0—12,0	—	35,0—45,0	11,0—14,0
АН-17	4,0	0,3	45,0—60,0	3,0

Шихта флюса ОСЦ-45 состоит из марганцевой руды, кварцевого песка и плавикового шпата. Флюс малочувствителен к ржавчине, дает плотные швы, стойкие против образования горячих трещин. Недостатком флюса является большое выделение вредных фтористых газов.

Шихта флюса АН-348А состоит из марганцевой руды, плавикового шпата, кварцевого песка и каустического магнетита. Он более чувствителен к коррозии, чем флюс ОСЦ-45, но выделяет меньше вредных фтористых газов.

Для сварки низкоуглеродистых сталей проволокой Св-08, Св-08А могут применяться керамические флюсы КВС-19 и К-11, приведенные в табл. 16.

При сварке высоколегированных сталей необходимо избегать окисления легирующих примесей, вводимых в металл шва из основного металла и сварочной проволоки. Поэтому обычно применяемые для сварки низколегированных сталей плавные флюсы при сварке высоколегированных сталей непригодны, так как содержащиеся в них в большом количестве окислы марганца и кремния при сварке окисляют хром, титан и другие полезные примеси. В результате снижается коррозионная устойчивость и сопротивление образованию горячих трещин металла шва. Кроме того, большое количество ок-

сварки углеродистых и легированных сталей

компонентов, %					
CaO	Al ₂ O ₃	K ₂ O Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	S	P
дистых сталей					
До 6,5	До 5,0	—	До 2,0	До 0,15	До 0,15
» 6,5	» 4,5	—	» 2,0	» 0,15	» 0,12
» 6,5	» 5,0	—	» 2,0	» 0,15	» 0,10
» 6,5	» 4,5	—	» 2,0	» 0,15	» 0,12
3,5	11,0	—	» 0,5	—	—
5,5	13,0	—	» 1,5	До 0,15	До 0,15
ванных сталей					
12,0—15,0	19,0—23,0	1,0—2,0	До 1,0	До 0,06	До 0,05
4,0—8,0	19,0—23,0	—	1,5	» 0,10	» 0,10
До 8,0	28,0—34,0	—	—	» 0,05	» 0,04
16,0—23,0	20,0—27,0	—	1,5	—	—

сидов (FeO , MnO , SiO_2 , TiO_2) в жидком шлаке окисляет тонкий верхний слой затвердевшего шва, и эта пленка оксидов прочно сцепляется с оксидами застывшего шва, что затрудняет удаление корки шлака с поверхности шва. Поэтому для сварки высоколегированных сталей применяют пассивные по химическим свойствам основные флюсы, не содержащие или содержащие очень мало оксида марганца (II) и кремнезема (табл. 15).

Таблица 16. Состав шихты (массовая часть) керамических флюсов

Материал	Флюс КВС-19	Флюс К-11
Руда марганцевая	54	60
Песок кварцевый	30	20
Шпат плавиковый	7	10
Ферросилиций 75 %-ный	7	10
Алюминиевая пудра	2	—
Натриевое жидкое стекло (от массы сухой смеси)	15—17	15

В тех случаях, когда в металле необходимо сохранить элементы, имеющие большое сродство к кислороду, следует применить бескислородные флюсы, химически инертные к металлу сварочной ванны, например флюс БКФ-1 или керамический флюс ФЦК.

Технология изготовления флюсов

Производство плавеных флюсов. Процесс производства плавле-

ных флюсов складывается из трех стадий: подготовка шихты, выплавка флюса, грануляция и последующая обработка флюса.

Подготовка шихты содержит в основном те же операции, что и подготовка подобных материалов электродных покрытий до операции помола. Измельчение кусковых материалов производится до получения зерен размером 2—3 мм. Подготовленные материалы дозируются по данным паспорта на флюс или по расчету и тщательно смешиваются (кроме плавикового шпата).

Плавка флюса производится в электродуговых или пламенных печах. Плавиковый шпат добавляют в шихту флюса в последний период плавки во избежание излишних потерь фтора. Плавку ведут до полного расплавления шихты и надлежащего раскисления расплавленного флюса.

Грануляция флюса осуществляется двумя способами: мокрым и сухим. При мокрой грануляции для получения

стекловидного флюса расплавленный флюс сливают тонкой струей в бак с водой. Попадая в воду, флюс дробится на относительно мелкие частицы. Мокрый способ грануляции прост и удобен в эксплуатации. При сухой грануляции флюс выливается в металлическую форму и после охлаждения измельчается механическим путем.

Сушка флюса после мокрой грануляции производится в специальных сушильных шкафах при температуре 250—350 °С. Высушенный флюс может иметь влажность не более 0,1 %. После сушки гранулированный флюс просеивается на механизированных ситах, расположенных в несколько рядов. Крупные зерна, остающиеся в первом сите, подлежат измельчению и повторному просеву. Зерна, остающиеся во втором сите, используются для сварки, а зерна, проходящие через второе сито, подлежат переплавке.

Контроль качества флюса заключается в проверке его соответствия требованиям ГОСТа или ТУ по химическому составу, размеру зерен, плотности, влажности и внешнему виду. В некоторых случаях качество флюса определяется при сварке, когда определяют стойкость сварных швов против образования пор и кристаллизационных трещин, качество формирования швов и стабилизирующие свойства флюса.

Производство керамических флюсов. Технология подготовки материалов шихты для изготовления керамического флюса содержит в основном те же операции, что и технология подготовки материалов электродных покрытий (см. схему 2).

После дозировки порошки тщательно смешиваются в специальных смесителях, а затем замешиваются на водном растворе жидкого стекла. Полученная однородная масса может обрабатываться несколькими способами.

1. Из массы готовятся брикеты, которые просушиваются и прокаливаются в течение 2—3 ч при температуре 350—450 °С, дробятся и просеиваются через сито 25 отверстий на 1 см². Недостатком этого способа является получение большого количества отходов в виде пыли и мелочи.

2. Протиранием сырой массы через проволочное сито на специальных машинах-грануляторах. В результате получают зернышки керамического флюса, достаточно однородные по размеру.

3. Продавливанием массы через решетку с отверстиями определенных размеров при одновременной резке на крупку вращающимися ножами.

§ 14. ГАЗЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ

Аргон, так же как и гелий, является одноатомным инертным газом, он бесцветен, не имеет запаха, тяжелее воздуха, что обеспечивает хорошую защиту сварочной ванны.

В промышленности аргон добывается при получении кислорода и азота из воздуха, массовая доля в котором составляет 1,28 %.

Аргон, предназначенный для сварки, регламентируется ГОСТ 10157—79 и в зависимости от содержания и назначения делится на три сорта.

Аргон высшего сорта (не менее 99,99 % Ar) предназначен для сварки титановых сплавов, циркония, молибдена и других активных металлов и их сплавов, а также особо ответственных изделий из нержавеющей сталей.

Аргон первого сорта (не менее 99,98 % Ar) предназначен для сварки плавящимся и неплавящимся электродом алюминиевых и магниевых сплавов.

Аргон второго сорта (не менее 99,95 % Ar) предназначен для сварки изделий из чистого алюминия, коррозионно-стойких сталей и жаропрочных сплавов.

Смеси аргона с другими газами в определенных процентных отношениях поставляются по особым ТУ.

Гелий — инертный газ без цвета и запаха, значительно легче воздуха. Получают из природных газов методом фракционной конденсации, который заключается в следующем. Природный газ, содержащий гелий, подвергают неоднократному сжатию и охлаждению, при этом примеси, имеющие более высокую, чем гелий, температуру сжижения, превращаются в жидкость. Гелий, температура сжижения которого равна -269°C , остается при этом в газообразном состоянии. После ряда сопутствующих химических очисток окончательная очистка гелия производится пропусканием его через активированный уголь, после чего он поступает в баллоны. ГОСТ 20461—75 предусматривает два сорта газообразного гелия: гелий высокой чистоты (99,98 He) и гелий технический (99,8 % He).

Углекислый газ в нормальных условиях представляет собой бесцветный газ с едва ощутимым запахом.

При повышенном давлении и низкой температуре углекислота переходит в жидкое или твердое состояние. Под давлением 528 кПа и при температуре -56°C углекислота может находиться во всех трех состояниях (так называемая тройная точка).

Плотность жидкой углекислоты сильно изменяется с температурой. Так, масса 1 л жидкой углекислоты при температуре $+20^{\circ}\text{C}$ равна 0,77 кг, а при температуре ниже 11°C жидкая углекислота становится тяжелее воды. Поэтому она поставляется не по объему, а по массе. При испарении 1 кг жидкой углекислоты образуется 509 л углекислого газа.

В промышленном масштабе углекислоту можно получить следующими способами:

1) из известняка, в котором содержится до 40 % CO_2 , кокса или антрацита путем их обжига в специальных печах;

2) на установках, работающих по сернокислому методу за счет реакций взаимодействия серной кислоты с эмульсией мела;

3) из газов брожения гидролизной, сахарной промышленности;

4) из выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания.

Рассмотрим третий способ получения CO_2 применительно к гидролизному производству, как более распространенный.

На гидролизных заводах при брожении дрожжей с опилками выделяются газы, содержащие 99 % CO_2 (рис. 46). Газ из бродильного чана 1 подается насосами, а при наличии достаточного давления поступает самостоятельно в газгольдер 2, где происходит отделение от него твердых частиц. Затем газ поступает в промывочную башню 3, заполненную коксом или керамическими кольцами, где он оmyвается встречным потоком воды и окончательно освобождается от твердых частиц и растворимых в воде примесей. После промывки газ поступает в предварительный компрессор 4, где он сжимается до давления 400—550 кПа.

Так как при сжатии температура газа повышается до $90-100^{\circ}\text{C}$, то после компрессора газ поступает в трубчатый холодильник 5, где охлаждается до 15°C . Затем

газ направляется в маслоотделитель 6, где отделяется масло, попавшее в газ при сжатии. После этого газ подвергается очистке водными растворами окислителей (KMnO_4 , $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{P}_7$, гипохромитом) в башне 7, а затем осушке активированным углем или силикагелем в башне 8.

После очистки и осушки газ поступает в двухступенчатый компрессор 9. На ступени I происходит сжатие

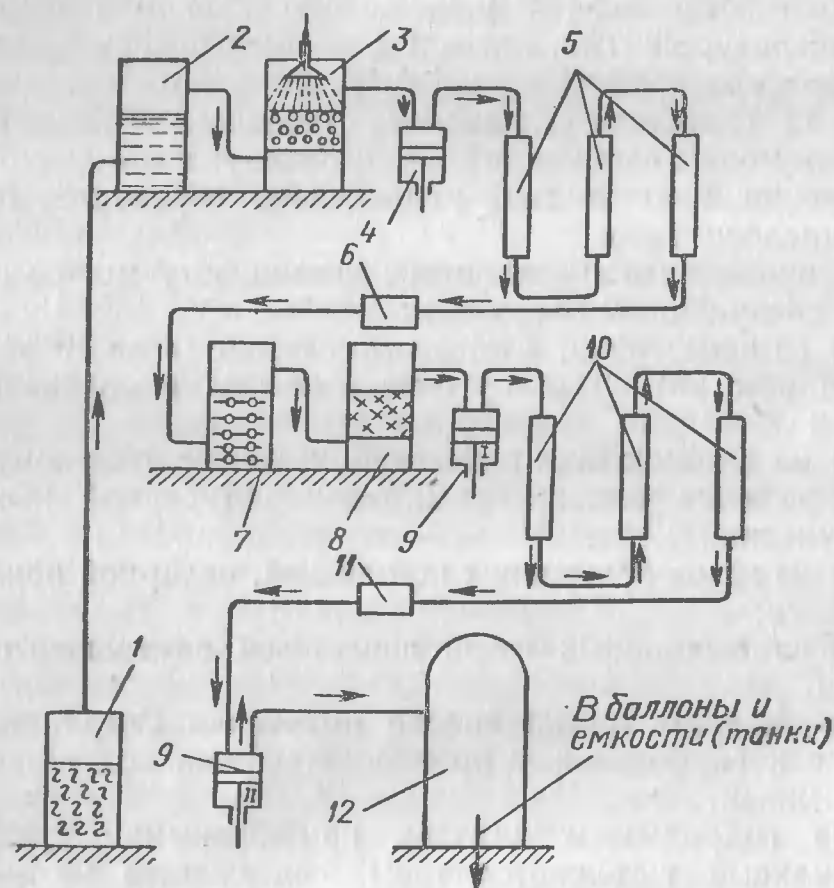


Рис. 46. Схема получения углекислого газа на гидролизных заводах

его до 1—1,2 МПа; затем он поступает в холодильник 10, где охлаждается со 100 до 15 °С, проходит маслоотделитель 11 и поступает на II ступень компрессора, где сжимается до 6—7 МПа, превращается в жидкость и собирается в цистерну 12, из которой производится наполнение стандартных баллонов или других емкостей (танков).

Хранится жидкая углекислота в баллонах при давлении 5—6 МПа.

В стандартные баллоны емкостью 40 л летом заливается 25 л углекислоты, при испарении которой образуется

12 600 л газа, а зимой заливается 30 л углекислоты при испарении которой образуется 15 120 л газа.

Углекислый газ, предназначенный для сварки, должен соответствовать ГОСТ 8050—76, который в зависимости от содержания CO_2 предусматривает два сорта сварочной углекислоты: первый сорт с содержанием CO_2 не менее 99,5 %, второй сорт с содержанием CO_2 не менее 99 %.

Сварочную углекислоту не разрешается заливать в баллоны из-под пищевой (98,5 % CO_2 не менее) и технической (98 % CO_2 не менее) углекислоты.

В связи с тем, что последние порции газа, выходящие из баллона, могут содержать повышенное количество паров воды, не следует использовать для сварки углекислоту при давлении в баллоне менее 0,4 МПа.

Азот — газ без цвета и запаха; при температуре —196 °С превращается в жидкость. Азот является нейтральным по отношению к меди, а при высоких температурах ряд металлов с азотом образует нитриды (титан, молибден и др.).

Получают азот из атмосферного воздуха, путем его сжижения с последующей ректификацией. Газообразный азот применяется для сварки меди, аустенитных сталей и плазменной резки. Технический газообразный азот должен соответствовать требованиям ГОСТ 9293—74, регламентирующего три состава азота: 1) электровакуумный, не менее 99,9 % азота; 2) первый сорт — не менее 99,5 % азота; 3) второй сорт — не менее 99,0 % азота, остальное — допустимое содержание кислорода.

Водород в чистом виде представляет собой газ в 14,5 раза легче воздуха, не имеющий цвета, запаха и вкуса.

Для промышленных нужд водород производится следующими способами:

1) электролизом дистиллированной воды, при котором получают водород, кислород и некоторые примеси;

2) железопаровым способом, основанном на пропускании через горячее восстановленное железо пара. В результате проходящей реакции образуется водород, окись железа и некоторые примеси;

3) электролизом раствора хлористых солей, при этом получается водород, хлор и некоторое количество примесей.

ГОСТ 3022—80 предусматривает четыре марки технического водорода: 1) А — 99,8 % H_2 ; 2) Б — 98 % H_2 ;

3) В первого сорта — 98,5 % Н, второго сорта — 97,5 % Н; 4) Г первого сорта — 97,5 % Н, второго сорта — 95 % Н.

Сравнительная стоимость 1 м³ газа при принятии за единицу стоимость 1 м³ азота:

Азот	1
Кислород	2
Водород	3
Углекислый газ	3
Аргон	20
Гелий	110

§ 15. УСЛОВИЯ ХРАНЕНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Электроды, флюсы, сварочная проволока, если их хранение не организовано, могут явиться причиной возникновения в сварных соединениях пор и других дефектов, поэтому к их хранению предъявляются определенные требования.

Электроды, флюсы, сварочная проволока должны храниться в специальных сухих отапливаемых помещениях при температуре не ниже 18 °С и относительной влажности воздуха не более 50 %.

Сварочные электроды и флюсы перед их выдачей в производство со склада должны подвергаться прокалке по режимам приведенных в паспортах или ТУ, разработанных предприятием-изготовителем. Так, например, электроды марки МР-3 прокаливаются при температуре 170—200 °С в течение 1,5 ч, электроды марки УОНИ-13/45 — при температуре 350—400 °С в течение 1,5 ч, флюсы марок ОСЦ-45 и АН-348 — при температурах 300—400 °С в течение 5 ч. После прокалки, если электроды не хранятся в герметической таре, они должны быть использованы в течение 5 сут, а флюс — в течение 15 сут.

Прокалка электродов может производиться не более 2 раз, помимо прокалки при их изготовлении.

Сварочная проволока должна храниться в условиях, исключающих ее загрязнение и окисление. Защитные газы хранятся и транспортируются преимущественно в баллонах емкостью 40—50 л при давлении 15 МПа, а жидкая углекислота под давлением до 6 МПа.

Для предохранения от коррозии и быстрого опознавания баллоны, согласно требованиям ГОСТ 949—73, окраши-

Таблица 17. Окраска баллонов и марка на них

Содержание баллона и надпись на нем	Цвет окраски		
	баллона	надписи	полосы
Гелий	Коричневый	Белый	—
Аргон технический	Черный	Синий	Синий
Аргон чистый	Серый	Зеленый	Зеленый
Азот	Черный	Желтый	Коричневый
Водород	Темно-зеленый	Красный	—
Углекислый газ	Черный	Желтый	—

ваются в разные цвета и имеют соответствующие надписи (табл. 17). В настоящее время наряду с баллонами для хранения и транспортировки газов начинают применяться танки-газификаторы как для углекислого газа, так и для аргона.

Углекислый газ транспортируют к месту потребления в основном и жидком виде в баллонах. Этот способ широко внедрен в производство, удобен там, где не требуется большого расхода СО₂, а также для рампового питания небольших цехов или участков.

При газификации углекислоты, поставляемой в баллонах, могут иметь место прекращения поступления газа по следующим причинам:

1) образование в баллоне сухого льда вследствие превышения количества потребляемого газа по сравнению с его количеством, образующимся в баллоне;

2) образование в редукторе пробок из твердого СО₂ и водяного льда происходит вследствие того, что в процессе дросселирования при резком снижении давления заметно падает температура.

Образование пробок из сухого и водяного льда можно предотвратить, если дросселировать не насыщенный пар, а перегретый, который после дросселирования будет иметь плюсовую температуру. Для этого между баллоном и редуктором устанавливается подогреватель (см. рис. 126).

Питание цехов углекислым газом или аргоном при большом их расходе может осуществляться от специальных рамп, обеспечивающих бесперебойное поступление газа к сварочным постам, или от танков-газификаторов, через соответствующие трубопроводы.

Транспортировка жидкой переохлажденной углекислоты танком-газификатором под давлением 0,8—1,2 МПа и температуре (—27)—(—56 °С) применена на многих предприятиях.

Транспортировка углекислоты производится автоцистерной (рис. 47), которая представляет собой двухбарабанный изотермический резервуар емкостью 3300 л, закрепленный в кузове автомашины или на прицепе.



Рис. 47. Общий вид газификатора (танка) низкого давления при безбаллонном снабжении CO_2

Автоцистерна вмещает в себя 2,7 т углекислоты. Прибывшая на завод-потребитель автоцистерна должна быть немедленно подана на площадку для перелива CO_2 в газификатор, который конструктивно оформляется так же, как и автоцистерна.

Недостаток способа — необходимость теплоизоляции танка. В

остальных отношениях этот способ более рациональный.

Транспортировка углекислоты должна производиться с соблюдением действующей инструкции, регламентирующей квалификацию шофера; ограниченные стоянки; поддержание определенного давления при аварийных стоянках и другие моменты, связанные с нормальной эксплуатацией автоцистерны.

ГЛАВА IV. МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ И ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКЕ

§ 16. ОСОБЕННОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СВАРКЕ

Процесс электрической сварки плавлением характеризуется химическими реакциями, которые возникают между расплавленным металлом и окружающей его средой. При переносе металла с электрода в сварочную

ванну капли и пары электродного металла, нагретые до высоких температур, взаимодействуют с газовой фазой и жидким шлаком. Расплавленный металл сварочной ванны также взаимодействует с газовой атмосферой, жидким шлаком и окружающим ее основным металлом. Поэтому химический состав наплавленного металла может существенно отличаться от химического состава электродов, а зона термического влияния — от исходного состояния основного металла. Это еще усугубляется высокими температурами на отдельных участках дуги, кратковременностью пребывания металла в жидком состоянии, быстрым изменением температурного режима.

Окисление металла и установление сродства элемента к кислороду

Кислород особенно интенсивно влияет на ход металлургических процессов при сварке. Окисление металла в сварочной ванне может происходить: при наличии в газовой фазе свободного кислорода или сложных газовых молекул (CO_2 , H_2O), способных при диссоциации выделять кислород; при наличии в шлаке оксидов, растворимых в металлической ванне; при химически активных компонентах, вступающих в обменные окислительно-восстановительные реакции с металлом сварочной ванны.

Окисление металла свободным кислородом газовой фазы протекает тем более интенсивно, чем больше сродство металла к кислороду. Оценить степень сродства металла к кислороду можно по прочности образующегося оксида, которая зависит от его вида, температуры и от давления кислорода, взаимодействующего с оксидом.

С повышением температуры прочность оксида понижается, происходит его диссоциация и выделяется кислород. Однако это будет иметь место только лишь в том случае, когда давление соприкасающегося с оксидом кислорода будет меньше давления кислорода, выделяющегося при диссоциации оксида. Если давления равны, то диссоциация оксида не происходит и наступает равновесие.

Давление кислорода в данной системе при нахождении ее в состоянии равновесия носит название упругости диссоциации данного оксида и обозначается p_{O_2} .

Установлено, что положение равновесия реакции окисления данного элемента (реакция диссоциации его оксидов)

всецело определяется величиной упругости кислорода в равновесной системе или иначе упругостью диссоциации оксида p_{O_2} . Чтобы судить о направлении реакции окисления по упругости диссоциации оксида данного элемента, надо упругость диссоциации p_{O_2} сравнить с парциальным давлением кислорода $p_{O_2 \text{ факт}}$ в условиях реакции.

Парциальное давление представляет собой давление, которое оказывал бы газ, если бы он один находился в сосуде, в том количестве, в котором он находится в смеси.

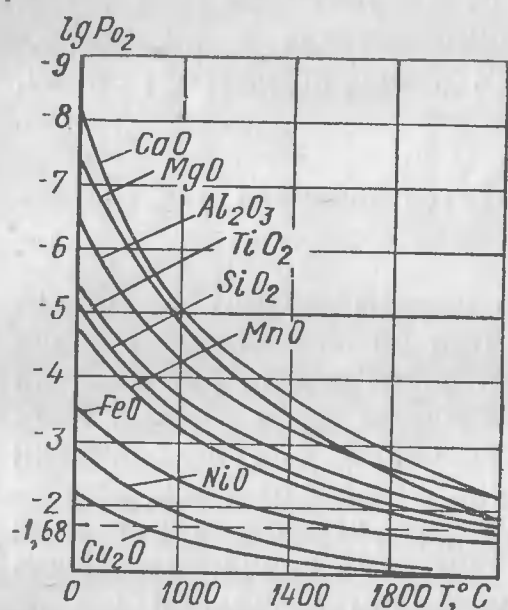


Рис. 48. Зависимость логарифма упругости диссоциации свободных оксидов от температуры

то состояние равновесия наступило, и реакция приостановится. У большинства металлов упругость диссоциации оксидов меньше парциального давления кислорода в атмосфере, поэтому они окисляются на воздухе.

Упругость диссоциации оксида и, следовательно, сродство элементов к кислороду зависит от температуры. Обычно упругость диссоциации оксидов с повышением температуры у всех металлов увеличивается, а сродство к кислороду уменьшается. Зависимость упругости диссоциации оксидов разных металлов от температуры представлена на рис. 48. Чем выше расположена кривая в этой системе координат, тем меньше упругость диссоциации представляемого ею оксида и тем более сильным раскислителем будет рассматриваемый элемент.

Тогда парциальное давление кислорода при 0 °С и 0,1 МПа составит примерно 0,021 МПа.

Если при комнатной температуре упругость диссоциации оксида p_{O_2} меньше парциального давления кислорода в атмосфере $p_{O_2 \text{ факт}}$, то состояние оксида устойчиво, и металл на воздухе окисляется. Если p_{O_2} выше $p_{O_2 \text{ факт}}$, то устойчивым состоянием будет чистый металл. Металлы с высокой упругостью диссоциации не окисляются на воздухе, например, золото, платина. Если $p_{O_2} = p_{O_2 \text{ факт}}$,

Для любого оксида область графика, лежащая выше соответствующей кривой, определяет устойчивое существование данного элемента в свободном состоянии, т. е. в чистом виде, а область графика, находящегося ниже этой кривой, определяет условие устойчивого существования оксида данного элемента. Для удобства сопоставления упругости диссоциации оксида с парциальным давлением кислорода логарифм парциального давления кислорода в воздухе, равный — 1,68, нанесен на график в виде штриховой линии.

Так, при равных концентрациях и температуре 2000 °С наибольшим сродством к кислороду обладает Са, затем Mg, Al, Ti, Si, Mn, Fe, Ni и Cu. Последние два элемента обладают меньшим сродством к кислороду, чем железо. Рассмотренное справедливо, если элементы окисляются свободно и независимо друг от друга, находясь в одинаковых внешних условиях.

В реальных условиях сварки последовательность окисления элемента сплава и скорость протекания окисления зависят не только от степени сродства элемента к кислороду, но и от концентрации его в расплаве. При этом установлено, что элемент будет окисляться тем легче, чем больше его концентрация.

Диссоциация газов и некоторых материалов покрытий и флюсов в дуге

При диссоциации молекулярный водород, кислород и азот распадаются по следующим реакциям:



Степень диссоциации характеризуется отношением распавшихся молекул к первоначальному числу молекул в единицах объема.

На рис. 49 показана зависимость степени диссоциации водорода и азота от температуры. Как видно из рисунка, степень диссоциации с увеличением температуры асимптотически приближается к единице. Такие газы, как водород и кислород, при температуре дуги почти полностью диссоциируют на атомы, а азот при этой температуре

диссоциирует незначительно. Атомарный кислород, азот и водород, соединяясь с металлом шва, ухудшают его свойства.

Наряду с диссоциацией простых газов при сварке наблюдается диссоциация материалов покрытий и флюсов, таких как плавикового шпата CaF_2 , мрамора CaCO_3 и др. Продукты диссоциации материалов покрытий и флюсов оказывают влияние на устойчивость горения дуги и ход металлургических процессов. Плавиковый шпат при высоких температурах разлагается

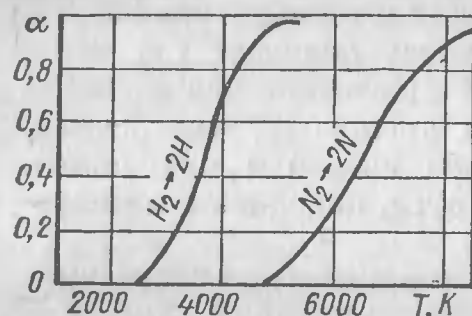


Рис. 49. Зависимость степени диссоциации α водорода и азота от температуры



молекулы фтора под действием теплоты дуги почти полностью диссоциируют и вследствие большого сродства к электрону захватывают электроны, образуя отрицательные ионы фтора:

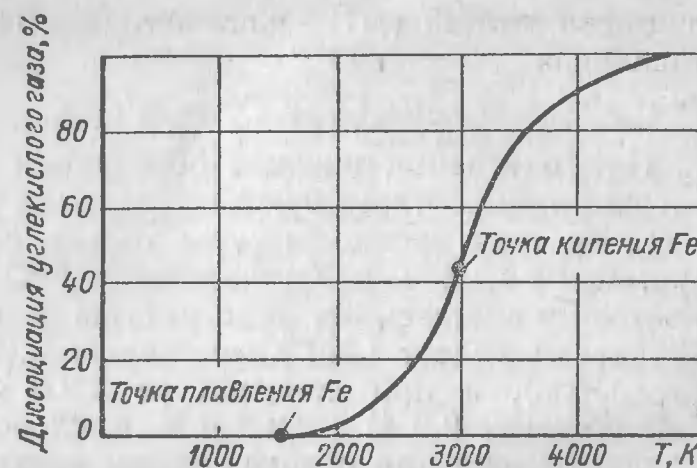


Расчеты показали, что при $T = 3000^\circ\text{C}$ степень диссоциации фтора составляет 0,92, а степень ионизации 0,0178 или 1,78 % фтора будет в состоянии отрицательных ионов. При сварке металлическими электродами температура столба дуги может быть в пределах 6000—7000 $^\circ\text{C}$, при которой диссоциация фтора будет большой и соответственно возрастает степень ионизации. Образование большого количества отрицательных ионов приводит к снижению проводимости дугового промежутка (в связи с уменьшением концентрации электронов) и снижению устойчивости горения дуги. Но в то же время кальций-фтор при сварке выполняет ряд полезных функций, в частности фтор уменьшает вероятность насыщения наплавленного металла водородом, так как освобождающийся при диссоциации атомарный фтор связывает водород в устойчивую нерастворимую в металле молекулу HF . Реакцию взаимодействия водорода с фтором схематически можно представить уравнением



Влияние диссоциации карбонатов рассмотрим на примере разложения мрамора CaCO_3 . В состав многих покры-

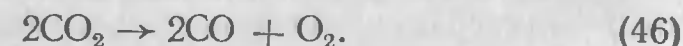
Рис. 50. Зависимость степени диссоциации α углекислого газа от температуры



тий входят карбонаты — соли угольной кислоты; особенно широко применяется карбонат кальция CaCO_3 . Разлагаясь при высоких температурах, CaCO_3 образует углекислый газ и оксид кальция:



Чем выше температура, тем больше распадается мрамор, а наряду с этим диссоциирует углекислый газ:



Зависимость степени диссоциации CO_2 от температуры приведена на рис. 50.

§ 17. КИСЛОРОД, АЗОТ, ВОДОРОД И ИХ ВЛИЯНИЕ НА МЕТАЛЛ ШВА

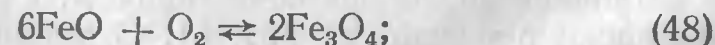
Для лучшего понимания процессов влияния кислорода и азота рассмотрим их на примере сварки тонкопокрытыми электродами.

Кислород при температуре дуги почти полностью диссоциирует на атомы, а окисление металла с участием атомарного кислорода идет более интенсивно. С железом кислород образует три вида оксидов:

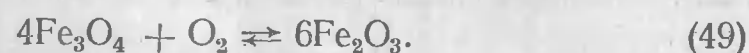
оксид железа (II) (закись железа), содержащая 22,7 % кислорода,



магнетит (закись-окись железа), содержащий 27,6 % кислорода,



оксид железа (III) (окись железа), содержащий 30 % кислорода



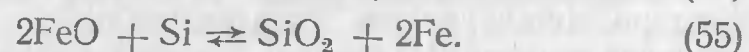
При окислении сначала образуются низшие оксиды, которые при соответствующих условиях переходят в высшие. Из трех оксидов железа только оксид железа (II) растворим в железе. Растворимость FeO в железе уменьшается с понижением температуры и при температуре плавления железа 1520 °C составляет 0,83 % (или 0,18 % кислорода), а при температуре 2300 °C растворимость FeO составит 8,5 % (или 1,8 % кислорода).

Фактически при сварке голыми электродами содержание кислорода в наплавленном металле достигает 0,2—0,7 %, что заметно меньше верхнего предела растворимости кислорода. Это объясняется созданием некоторой защиты сварочной ванны парами металла и CO, выделяющимися в процессе плавления металла; наличием в расплавленном металле углерода и марганца, которые ограничивают растворимость кислорода в жидком металле и др.

Наряду с окислением железа при сварке тонкопокрытыми электродами имеет место окисление других составляющих металла стержня и сварочной ванны: C, Mn, Si. Окисление может происходить за счет атомарного кислорода при переходе капли через дугу по реакциям:



и за счет взаимодействия с оксидом железа (II) в расплавленной ванне:



Процессы окисления составляющих приводят к тому, что количество полезных примесей в наплавленном металле уменьшается, а содержание кислорода возрастает (табл. 18). Присутствие кислорода в металле резко ухудшает его механические и технологические свойства.

Влияние кислорода на механические свойства металла наплавки показано на рис. 51. С повышением содержа-

Таблица 18. Химический состав исходных материалов и металла шва, выполненного электродами со стабилизирующим покрытием

Исходные материалы и металл шва	ГОСТ	Марка	Массовое содержание элементов, %				
			C	Mn	Si	O ₂	N ₂
Основной металл	ГОСТ 380—71	БСтЗсп	0,20	0,5	0,20	0,003	0,007
Сварочная проволока	ГОСТ 2246—70	Св-08	0,08	0,54	0,02	0,017	0,007
Металл шва	—	—	0,10	0,15	Следы	0,24	0,20

ния кислорода снижается предел прочности, предел текучести, ударная вязкость, ухудшается ковкость, коррозионная стойкость, жаропрочность и другие свойства металла шва.

Раскисление за счет углерода реакции (53) приводит к выделению оксида углерода (II), который нерастворим в стали и стремится всплыть на поверхность сварочной ванны. Если шлак, покрывающий сварочную ванну, будет плохо пропускать газы, то это приведет к накоплению газов по линии раздела металл—шлак, давление газов на сварочную ванну возрастает, скорость всплытия газа из металла замедлится и это при определенной скорости кристаллизации металла шва может привести к образованию пор.

Образование пор вследствие окисления углерода возможно еще и тогда, когда эта реакция продолжается в кристаллизующейся части сварочной ванны.

Азот в газовую фазу зоны сварки попадает из окружающего воздуха. В зависимости от температуры азот может находиться в газовой фазе в молекуляр-

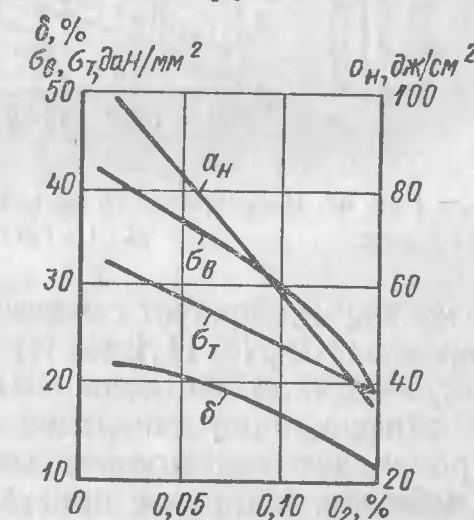


Рис. 51. Влияние содержания кислорода на механические свойства наплавки

ном, атомарном и ионизированном состоянии, что видно из рис. 15 и 49.

Азот растворяется в тех металлах, с которыми он вступает в химическое взаимодействие с образованием нитридов. К этим металлам относятся железо, марганец, титан, молибден и некоторые другие. Рассмотрим подробнее взаимодействие азота с железом. При высоких температурах азот является весьма активным по отношению

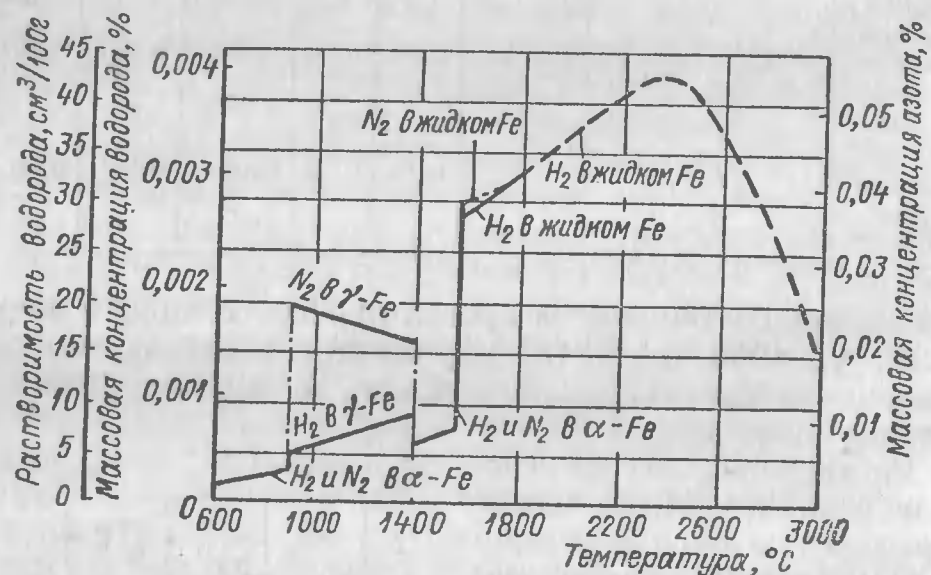


Рис. 52. Растворимость азота и водорода в железе в зависимости от температуры

к железу и образует с железом химические соединения — нитриды Fe_2N (11,1 % N) и FeN (5,9 % N), которые устойчивы до определенных температур.

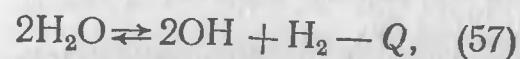
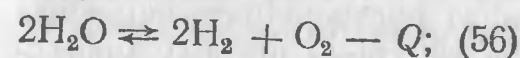
Диссоциация нитридов при высоких температурах происходит тем полнее, чем выше концентрация азота в металле. Наряду с присутствием азота в железе в виде нитридов азот еще способен растворяться в железе (рис. 52).

Азот существенно изменяет свойства металла шва. Наблюдаемое скачкообразное изменение растворимости газообразного азота в металле при его расплавлении (кристаллизации) может явиться причиной появления и развития пор в металле шва. Увеличение содержания азота в стали приводит к усилению склонности стали к старению и изменению механических свойств (рис. 53).

Для уменьшения содержания азота в металле шва крайне желательно исключить азот из газовой фазы дуги,

что достигается сваркой закрытой дугой и сваркой в углекислом газе. В последнем случае металл заметно окисляется и раскисляется, но не поглощает азот. Кроме того, уменьшение содержания азота в металле шва может быть достигнуто введением в металл элементов, имеющих большое сродство к азоту (марганец, титан), за счет которых образуются нитриды, переходящие затем в шлак.

Водород, подобно кислороду и азоту, поглощается в процессе сварки металлом шва. Источником водорода в газовой фазе при сварке могут служить атмосферная влага, влага покрытия и флюса, влага ржавчины на поверхности сварочной проволоки и свариваемых кромок. Под действием теплоты дуги влага превращается в пары воды, которые диссоциируют по уравнениям:



повышая концентрацию водорода в газовой фазе. Кроме того, источником водорода могут явиться органические составляющие покрытий (крахмал, декстрин, целлюлоза), которые при плавлении электрода разлагаются и выделяют наряду с другими газами (CO , CO_2 , H_2O) водород. Некоторое количество водорода содержится в присадочной проволоке и основном металле, поэтому кривая растворимости водорода (см. рис. 52) начинается на ординате выше нулевого значения, что характеризует наличие в основном и присадочном металле растворенного водорода.

В зависимости от температуры газовой фазы, как видно из рис. 15, водород может находиться в ней в молекулярном, атомарном и ионизированном состояниях. Характерной особенностью атомов и ионов водорода является их способность легко диффундировать в кристаллической решетке железа даже при комнатных температурах, так как по размерам они значительно меньше межатомного расстояния в кристаллической решетке железа.

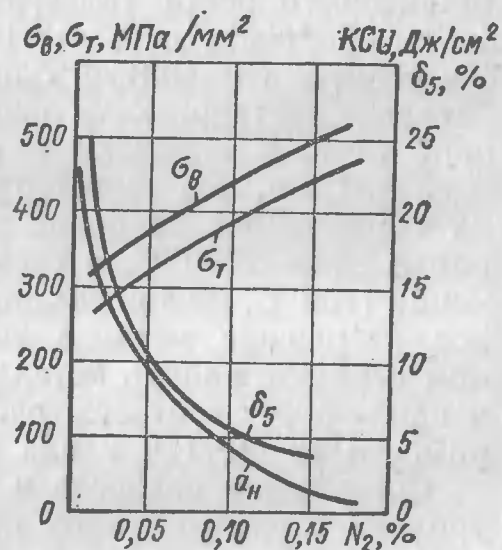


Рис. 53. Влияние азота на механические свойства наплавки

По кривой растворимости водорода в твердом и жидком железе (см. рис. 52) видно, что по мере увеличения температуры металла растворимость водорода увеличивается, претерпевая скачкообразные изменения в моменты аллотропических превращений железа. Предельная растворимость водорода в твердом железе при 1530 °С составляет 8 см³/100 г или 0,0007 %. Переход металла из твердого в жидкое состояние значительно увеличивает растворимость, достигающую 28 см³/100 г или 0,0025 %. По мере дальнейшего роста температуры растворимость растет, достигая максимума (43 см³/100 г) при температуре 2400 °С, а в области температур, близких к температуре кипения металла, растворимость падает, так как выделяющиеся пары металла увлекают за собой водород.

Учитывая, что температура капель металла в момент их образования на конце электрода и переноса в дуге равна 2200—2500 °С, а средняя температура ванны примерно 1700 °С, можно сделать заключение, что максимальное насыщение металла водородом происходит в дуге при переходе капель металла. И растворимость водорода в капле будет соответствовать верхнему пределу растворимости 43 см³/100 г или 0,0039 %.

Содержание водорода в металле, наплавленном электродами с разным видом покрытия, следующее.

1. Металл, наплавленный электродами с целлюлозным покрытием, содержит наибольший объем водорода, достигающий предела насыщения водородом жидкого металла, т. е. 26,6 см³/100.

2. Металл, наплавленный электродами с кислым или рутиловым покрытием, содержит 13—15 см³/100 г водорода.

3. Наименьшее содержание водорода в металле, наплавленном электродами с основным покрытием, т. е. 8,4 см³/100 г.

Водород существенно влияет на свойства наплавленного металла. Различная растворимость водорода в твердом и жидком металле приводит к выделению водорода при охлаждении перегретого металла, что приводит к разбрызгиванию. При охлаждении расплавленного металла сварочной ванны растворимость уменьшается и водород будет выделяться из жидкого металла. В момент достижения температуры плавления металла и начала его кристаллизации растворимость падает скачкообразно и уменьшается в несколько раз.

В кристаллизующемся металле сварочной ванны существует совместно жидкий и твердый металл, а скорость диффузии водорода при температуре кристаллизации велика, и водород быстро перераспределится между кристаллами и жидким металлом. В результате чего жидкий металл окажется пересыщенным водородом, что приведет к его выделению по реакции.



Но так как молекулярный водород нерастворим в металле, то его выделение из кристаллизующегося металла может явиться причиной возникновения и развития пор в металле шва. Водород может явиться виновником появления ряда дефектов (трещин, «рыбьих глаз» и т. д.) в сварном соединении.

Образование микротрещин в металле шва может иметь место вследствие того, что процесс выделения водорода не прекращается и по окончании кристаллизации металла и даже по достижении комнатной температуры. В полностью остывшем металле, пересыщенном водородом, происходит его выделение не только во внешнюю среду, но и в микроскопические полости (поры), всегда имеющиеся в твердом металле. Молекулярный водород, накапливаясь в микрополостях, создает в них большое давление, вызывающее местное разрушение металла.

Образование «рыбьих глаз» встречается на поверхности излома металла шва образцов, подвергшихся деформации с малой скоростью, например при испытаниях на разрыв и загиб. «Рыбьи глаза» выявляются в виде светлого диска небольшого диаметра с очень малой полостью в центральной части (рис. 54). Обычно они возникают вокруг включений. Светлый цвет излома в месте этих дефектов свидетельствует о наличии хрупкого разрушения, связанного с наличием очень больших давлений молекулярного водорода в полости.

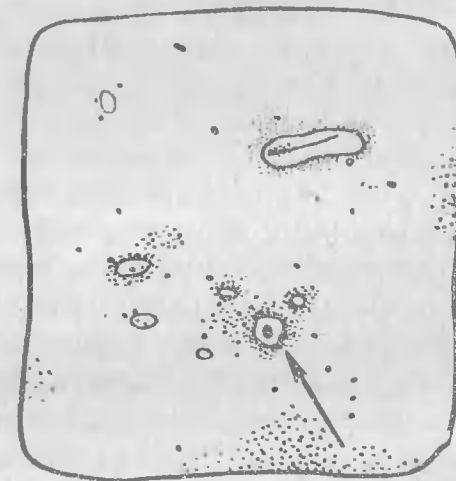


Рис. 54. Внешний вид «рыбьего глаза» в изломе разрывного образца

Характерно, что «рыбьи глаза» никогда не наблюдаются в изломах сварных образцов, подвергшихся быстрой пластической деформации, например в образцах, испытанных на ударную вязкость. Наличие такого дефекта в изломе образцов обычно вызывает снижение пластических характеристик металла шва (относительное удлинение и относительное сужение). Чтобы ликвидировать склонность металла шва к образованию рыбьих глаз, требуется удалить водород из металла шва, что может быть достигнуто длительной выдержкой металла шва при комнатной температуре или более короткой выдержкой при температуре 250—300 °С.

Под влиянием водорода образуются трещины в основном металле. Нами было установлено, что диффузия водорода в твердом металле возможна только в атомарном состоянии или в виде протона. Растворимость водорода в металле будет зависеть от его температуры; по мере охлаждения водород из мест большей концентрации устремится в более холодные участки основного металла. Атомы водорода, диффундируя в кристаллическую решетку, создают чрезмерное насыщение охлаждаемого металла водородом, что резко снижает пластические свойства металла. В то же время, атомы, диффундируя в несплошности, внутрикристаллические прослойки и т. п., образуют молекулярный водород. Молекулярный водород, накопившись, приводит к возникновению высоких напряжений, превышающих предел прочности основного металла и в околошовной зоне, и возникают трещины. Этому еще способствуют напряжения в сварных соединениях.

На растворимость водорода в металле влияет ряд технологических факторов. Установлено, что растворимость водорода в металле связана с родом тока и полярностью. При сварке на постоянном токе обратной полярности протоны водорода H^+ направляются электрическим полем к сварочной ванне (катоде), температура которой относительно невелика; соответственно и растворимость водорода в металле шва будет небольшой. При сварке на прямой полярности протоны H^+ устремляются к электроду, на конце которого находится сильно перегретый жидкий металл, способный растворить большое количество водорода. Капли этого металла, попадая затем в сварочную ванну, насыщают металл водородом, и содержание водорода в металле будет больше, чем при сварке на обратной полярности.

Уменьшение содержания водорода в металле шва может быть достигнуто:

- 1) применением для сварки прокаленных толстопокрывных электродов и флюсов;
- 2) тщательной зачисткой свариваемых кромок от ржавчины, окалины и прочих загрязнений;
- 3) выполнением последующих проходов многопроходных швов после полного охлаждения ранее выполненных проходов шва;
- 4) предварительным и сопутствующим нагревом деталей.

§ 18. МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СВАРКЕ ТОЛСТОПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Металлургические процессы при дуговой сварке толстопокрывными электродами характеризуются малыми количествами реагирующих веществ, кратковременностью, высокими температурами и интенсивным взаимодействием между металлом, газом и шлаком. При плавлении электрода расплавленное покрытие частично переносится через дуговой промежуток в виде шлаковой оболочки вокруг капели при их переходе с электрода в шов, а частично непосредственно стекает в ванну. Капли на конце электрода в процессе перехода через дуговой промежуток нагреваются до 2200—2500 °С, и между расплавленным металлом, жидким шлаком и газом протекают сложные физико-химические процессы. При этом содержание азота в металле шва может служить критерием эффективности защиты металла в процессе сварки.

На ход металлургических процессов и химический состав металла шва при сварке толстопокрывными электродами существенное влияние оказывает состав и коэффициент массы покрытия электродов, под которым понимают отношение массы покрытия $m_{\text{п}}$ к массе покрытой части стержня электрода $m_{\text{п. ст}}$:

$$k_{\text{п}} = m_{\text{п}}/m_{\text{п. ст}}. \quad (59)$$

Установлено, что при электродах со шлакозащитным покрытием коэффициент покрытия до 0,3 оказывает влияние на содержание азота в металле шва, при большем значении коэффициента покрытия этого не наблюдается. Но, учитывая, что имеет место применение комбиниро-

ванной шлако-газовой защиты, оказывается возможным в широко применяемых толстопокрытых электродах при $k_n = 0,25 \div 0,35$ получить металл шва по содержанию азота такой же, как металл, выплавленный в дуговой электропечи.

Ранее нами были рассмотрены составы покрытий, основная область их применения и общая характеристика наплавленного металла. Рассмотрим особенности процессов раскисления, легирования и рафинирования металла при сварке.

Осаждающее и диффузионное раскисление

В процессе сварки наряду с рядом других процессов имеет место взаимодействие между металлическими составляющими (металл — металл) и оксидом металла, находящегося в капле и металлической ванне со шлаком.

Осаждающим раскислением принято называть раскисление, происходящее в жидком металле капли или ванны за счет элементов, имеющих большее сродство к кислороду, чем свариваемый металл, что видно из реакций (54) и (55). По этому признаку, при прочих равных условиях (концентрация, температура, состав шлаковой и газовой фазы), элементы, участвующие обычно в процессе сварки, можно расположить по убывающей способности к раскислению (сродству к кислороду) в следующий ряд: Al, Zr, Ti, Si, V, Mn, Cr, Mo, W, Fe, Co, Ni, Cu. Этот же ряд может служить критерием оценки способности каждого элемента легировать металл. Рассмотрим это применительно к стали.

Элементы, находящиеся в ряду справа от железа, практически полностью усваиваются сварочной ванной; элементы, расположенные слева от железа, в той или иной степени окисляются и лишь частично легируют металл шва. При данном количестве вводимого элемента степень легирования будет тем ниже, чем дальше элемент расположен слева от железа, т. е. чем больше его сродство к кислороду. Такие элементы, как Ti, Zr, Al, при дуговой сварке толстопокрытыми электродами практически полностью окисляются, а в металле шва обычно имеются только следы этих элементов. А такие элементы, как W и Mo, в большей степени усваиваются сварочной ванной.

Для оценки степени использования данного элемента в процессе сварки или наплавки введено понятие коэффициента перехода легирующего элемента и коэффициента его усвоения. Коэффициент перехода определяется отношением содержания рассматриваемого элемента в наплавленном металле к содержанию этого элемента раздельно в материалах, участвующих в процессе сварки (проволоке, покрытии, флюсе, шихте, порошковой проволоке и т. д.).

Коэффициент усвоения характеризуется отношением содержания легирующего элемента в металле шва к суммарному его содержанию в материалах, участвующих в процессе, в том числе в основном металле. Эти коэффициенты определяются расчетом или по графикам и таблицам, составленным расчетным или опытным путем. В табл. 19 приведены коэффициенты перехода и усвоения некоторых элементов при сварке высоколегированных сталей электродами марки КТИ-5, имеющими стержень из проволоки Св-Х18Н11М.

Диффузионное раскисление заключается в том, что между основными оксидами (например, FeO), находящимися в расплавленном металле, и кислыми оксидами (например, SiO₂), находящимися в шлаке на границе металл—шлак, происходит взаимодействие



При этом образуется силикат железа (комплексное соединение), которое в составе шлаков всплывает на поверхность металлической ванны. Чем выше концентрация

Таблица 19. Коэффициенты перехода и усвоения некоторых элементов при сварке электродами марки КТИ-5

Легирующий элемент	Коэффициент перехода *		Коэффициент усвоения
	для проволоки	для покрытия	
Mn	0,75—0,80	0,6—0,65	0,70
Cr	0,94—0,97	0,85—0,90	0,90
Mo	0,90—0,95	0,75—0,80	0,85
V	—	0,85	0,85
Ni	1,0	—	1,0

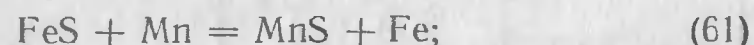
* В данном случае коэффициент перехода для основного металла не рассматривается.

кремнезема в шлаке над жидким металлом, тем интенсивнее протекает диффузионное раскисление. В результате оксид железа (II) из металлической ванны переводится в шлак и тем самым кислород выводится из металла шва.

При большом содержании силиката кремния в шлаке и малом содержании оксида железа (II) в жидком металле реакция (60) может пойти справа налево и металл будет окисляться за счет оксида железа (II). Поэтому в шлаке должно находиться достаточное количество кремнезема, чтобы обеспечить диффузионное раскисление, а не окисление. Однако чрезмерное содержание в шлаке SiO делает шлак длинным, малоподвижным и, как следствие, химически малоактивным. Поэтому, когда по ряду соображений в покрытие или флюс требуется ввести большое количество кремнезема, вместе с ним вводят флюсующие материалы, придающие шлаку жидкотекучесть и тем самым способствующие диффузионному раскислению.

Рафинирование металла шва

Сера и фосфор являются вредными примесями в сталях. Сера попадает в сварочную ванну из основного металла, сварочной проволоки, покрытия и флюса. Наиболее неблагоприятной формой сернистых соединений в металле шва является FeS, так как сульфид железа в процессе кристаллизации образует с железом эвтектику (имеющую температуру плавления 940 °С), которая располагается между зернами и является основной причиной возникновения горячих трещин. Поэтому десульфация металла шва является очень важной металлургической операцией и достигается введением в сварочную ванну элементов или компонентов, имеющих большее сродство к сере, чем железо, и образующих соединения с высокой температурой плавления, не растворяющиеся в жидкой стали. К таким элементам относится марганец, десульфация за счет которого протекает по реакциям:

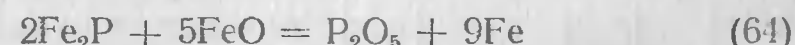


Сульфид марганца имеет температуру плавления около 1650 °С, мало растворим в жидкой стали и образует в ней обособленную фазу, имеющую глобулярную форму. Такие швы сохраняют стойкость против горячих трещин.

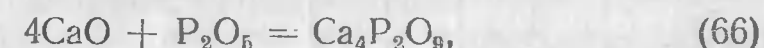
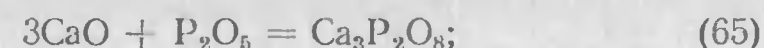
Десульфация может быть также осуществлена за счет оксида кальция



Фосфор в металле шва находится в виде фосфидов железа Fe₃P и Fe₂P. Увеличение содержания фосфора в металле шва заметно снижает ударную вязкость, особенно при низких температурах, поэтому фосфор необходимо удалять. Это может быть достигнуто путем его окисления



и последующего связывания оксида фосфора в прочное химическое соединение:



удаляемое затем в шлак.

Рассмотрим особенности протекания металлургических процессов при сварке толстопокрытыми электродами с покрытиями различного вида.

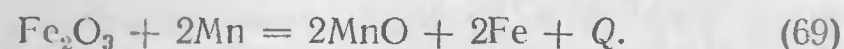
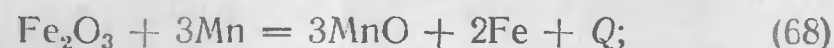
Металлургические процессы при сварке электродами с разным видом покрытий

Металлургические процессы сварки электродами с покрытием кислого вида рассмотрим на примере сварки электродами ЦМ-7, покрытие которых содержит 33 % гематита, 32 % гранита, 30 % ферромарганца, 5 % крахмала (или целлюлозы) и жидкого стекла 25—30 % от массы сухой смеси. При сварке гематит расплавляется и будет взаимодействовать с жидким железом капли в момент ее образования на конце электрода по реакции:



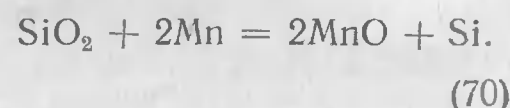
жидкий металл будет обогащаться кислородом за счет оксида железа (II) из шлака. При этом существует прямая зависимость между содержанием оксида железа (II)

в шлаке и его содержанием в шве (рис. 55). Ферромарганец, введенный в покрытие, предназначен раскислить металл шва:



Восстановление железа и тепло, выделяющееся при окислении марганца, обеспечивают при сварке электродами ЦМ-7 высокий коэффициент наплавки, равный 10—11 г/(А·ч).

Наряду с Fe_2O_3 в покрытии также имеется некоторое количество SiO_2 , которое в связи с большой концентрацией частично восстанавливается



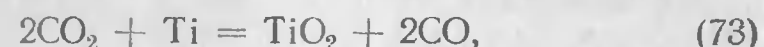
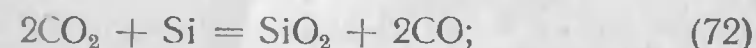
Интенсивному протеканию этой реакции препятствует высокая концентрация окиси железа (II): содержание кремния в металле шва составляет около 0,1 %, а марганца 0,75—0,8 %. Кон-

центрация кремния и марганца достаточна для подавления реакции окисления углерода в задней кристаллизующейся части сварочной ванны и создания препятствия к образованию пор за счет оксида углерода (II).

Металлургические процессы сварки электродами с покрытием основного вида рассмотрим на примере сварки электродами УОНИ-13, содержащими мрамор, плавиковый шпат, ферромарганец, ферросилиций, ферротитан, кварцевый песок и жидкое стекло.

При сварке под воздействием теплоты дуги происходит диссоциация мрамора по реакции (45), и расчетное количество CO_2 , отнесенного к нормальной температуре и давлению, составит 30—45 см³ газа при сгорании 1 см длины электрода. Углекислый газ за счет ранее указанных раскислителей при температуре 700 °С и выше восста-

навливается в значительной степени до СО по реакциям:

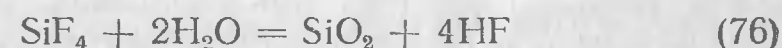
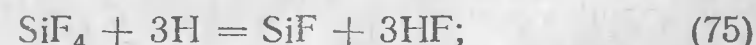


но часть СО остается невосстановленной, и газовая фаза во всем температурном интервале зоны сварки будет иметь окислительный характер по отношению к жидкому металлу, в то время как окисляющее действие шлака незначительно. Благодаря образованию пленки шлака на каплях (при их переходе в шов) и на поверхности сварочной ванны, а главное в связи с наличием большого количества раскислителей в наплавленном металле содержание кислорода будет невелико: не превышает его содержания в электродной проволоке.

Имеющийся в покрытии плавиковый шпат способен связывать водород по реакции (44), а присутствие в покрытии SiO_2 приводит к образованию тетрафторида кремния:



Образовавшийся тетрафторид кремния улетучивается, переходя в газовую фазу, где он взаимодействует с атомарным водородом или парами воды:



и тем самым способствует уменьшению количества водорода в металле шва.

Значительная концентрация марганца в сварочной ванне способствует десульфации металла, а большое содержание в шлаке СаО наряду с десульфацией способствует удалению из металла фосфора. Содержание серы и фосфора в наплавленном металле не превышает 0,035 % каждого и это делает швы, выполненные электродами этой группы, малочувствительными к кристаллизационным трещинам. Но установлено, что небольшое содержание кислорода в сварочной ванне уменьшает вероятность взаимодействия кислорода с растворенным в металле водородом:

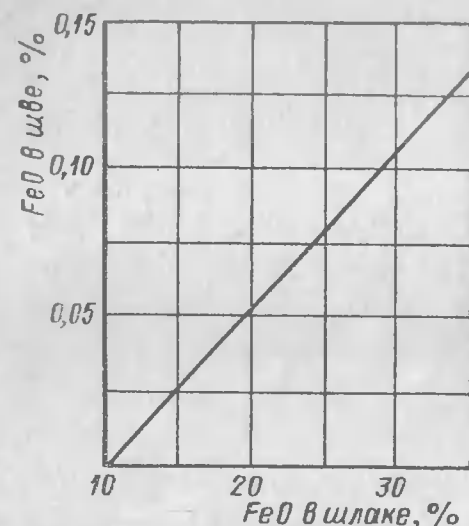


Рис. 55. Зависимость между содержанием оксида железа (II) в шлаке при сварке электродами ЦМ-7 и содержанием оксида железа (II) в шве

Поэтому содержание растворенного в металле водорода настолько велико, что при наличии ржавчины на свариваемых кромках, повышенной влажности покрытия и сварке длинной дугой приводит к порам в шве, несмотря на эффективное удаление водорода за счет плавикового шпата, имеющегося в покрытии.

Металлургические процессы при сварке электродами с рутильным покрытием рассмотрим на примере сварки электродами АНО-4с (см. форму 1). Газовая защита в покрытии АНО-4с осуществляется за счет разложения магнезита



и окисления целлюлозы. Поэтому в газовой фазе наряду с CO_2 имеются продукты окисления целлюлозы, которые и обеспечивают газовую защиту. Мусковит, например, обеспечивает устойчивое горение дуги и шлаковую защиту. Остальные составляющие покрытия выполняют функции, аналогичные этим же материалам в ранее рассмотренных видах покрытий.

Металлургические процессы при сварке электродами с органическим покрытием рассмотрим на примере электродов типа Э42 марки ВСЦ-4. Покрытие этого типа содержит до 50 % органических составляющих (пищевая мука, целлюлоза, крахмал и др.), которые при разложении в дуге создают газовую защиту расплавленного металла. Коэффициент покрытия составляет 0,1—0,15. Выделяющиеся при сварке газы содержат большое количество водорода. Во избежание насыщения металла шва водородом при сварке необходимо повышать степень окисленности сварочной ванны, для чего в покрытие вводят титановый концентрат ($\text{TiO}_2 \cdot \text{FeO}$) и марганцевую руду (MnO_2), которые выполняют также и функции шлаковой защиты. Раскислителем служит ферромарганец. Весьма полезно введение в покрытие плавикового шпата (CaF_2), который при наличии SiO_2 и TiO_2 в зоне высоких температур приводит к образованию SiF_4 и TiF_4 , связывающих водород в не растворимое в металле соединение HF , и тем самым уменьшают содержание водорода в сварочной ванне.

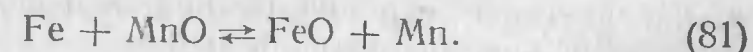
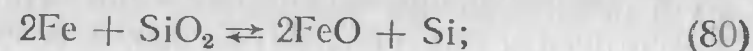
Предупреждение пористости, связанной с выделением оксида углерода (II) в стадии кристаллизации сварочной ванны, достигается введением в состав покрытия ферросилиция.

§ 19. МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СВАРКЕ ПОД ФЛЮСОМ И В ЗАЩИТНЫХ ГАЗАХ

Металлургические процессы при сварке под флюсами

При сварке под плавленными флюсами защита зоны сварки от окружающего воздуха происходит более эффективно, что подтверждается содержанием азота. При сварке тонкопокрытыми электродами содержание азота в металле шва составляет 0,12—0,2 %, при сварке толстопокрытыми электродами 0,013—0,030 %, а под плавленным флюсом 0,008 %.

Имеется ряд особенностей металлургических процессов при сварке под флюсом. Особенно интенсивно протекают металлургические процессы между жидким флюсом и металлом, в результате которых изменяется состав металла шва. Сварка низкоуглеродистой стали под марганцовистыми высококремнистыми флюсами характеризуется протеканием в высокотемпературных участках зоны сварки следующих кремнемарганцевосстановительных реакций:

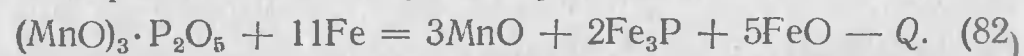


Также имеет место окисление углерода, содержащегося в сварочной проволоке и основном металле по реакции (50). Образующийся в высокотемпературном участке сварочной зоны оксид железа (II) частично растворяется в жидком металле сварочной ванны, частично переходит в шлак.

На участках сварочной ванны позади дуги при понижении температуры жидкого металла, вплоть до затвердения, имеет место раскисление металла. При температурах, близких к затвердению металла ванны, кремний и марганец подавляют реакцию окисления углерода, что уменьшает вероятность образования пор. При недостаточном содержании во флюсе кремнезема усиленно выгорает углерод, и в шве могут образоваться поры. Следовательно, при сварке низкоуглеродистой стали сварочной проволокой с малым содержанием кремния, чтобы избежать образования пор за счет окисления углерода, следует применять высококремнистый флюс.

Благодаря протеканию реакций (80), (81) металл шва обогащается кремнием и марганцем, а содержание углерода окажется несколько меньше исходного. Обогащение металла шва марганцем важно еще и потому, что он обеспечивает десульфацию металла шва, предупреждая тем самым горячие трещины. Исследования показали, что для предупреждения образования горячих трещин в металле шва при сварке под флюсом низкоуглеродистых сталей в шве должно быть не менее 0,6—0,8 % марганца.

В плавленные флюсы сера и фосфор попадают из исходных материалов, например из марганцевой руды. Если во флюсе имеются оксиды фосфора, то фосфор легко восстанавливается при сварке и переходит в металл шва. Переход фосфора из кислых высокомарганцовистых флюсов протекает по следующей реакции:



При этом переход фосфора и серы из флюса в шов зависит от содержания их, а также от марганца во флюсе и режима сварки. С увеличением содержания оксида марганца (II) во флюсе увеличивается его взаимодействие с металлом сварочной ванны, вследствие чего он связывает и переводит в шлак большее количество серы. Но с увеличением заиси оксида марганца (II) во флюсе возрастает и содержание фосфора, что способствует увеличению перехода фосфора в шов по реакции (82).

Изменение таких величин режима сварки, как силы сварочного тока и напряжение, изменяет содержание серы и фосфора в шве. При увеличении сварочного тока увеличивается количество расплавленного флюса, вследствие чего содержание фосфора в шве уменьшается, а серы несколько возрастает.

Повышение напряжения дуги при неизменном токе приводит к тому, что количество расплавленного флюса по отношению к количеству расплавленного металла значительно возрастает, вследствие чего переход марганца и кремния в шов увеличивается. Также возрастает переход фосфора, а содержание серы в металле шва уменьшается.

Повышение содержания оксида кальция во флюсе за счет соответствующего снижения содержания окиси марганца несколько увеличивает переход серы в металл шва, что указывает на превалирующую роль марганца в десульфации металла при автоматической сварке.

Наличие в составе керамических флюсов ферросплавов обуславливает следующие особенности металлургических процессов при сварке под керамическими флюсами: 1) более полное раскисление наплавленного металла; 2) возможность легирования наплавленного металла в широких пределах; 3) улучшение структуры швов путем их модифицирования.

Металлургические процессы при электрошлаковой сварке

Металлургические процессы при электрошлаковой сварке отличаются от дуговой сварки следующими особенностями:

- 1) в плавильной зоне отсутствует газовая фаза;
- 2) температура в зоне сварки ниже, чем при дуговой;
- 3) сменность шлака-флюса незначительна;
- 4) при сварке имеет место электролиз шлака шлаковой ванны;
- 5) поверхность шлаковой ванны заметно окисляется кислородом воздуха.

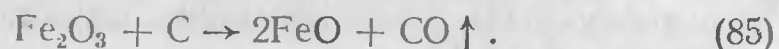
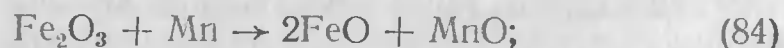
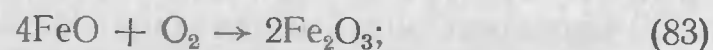
Из-за отсутствия газовой фазы основную роль играют металлургические процессы между жидким шлаком и металлом. Как нами ранее было установлено, активность и характер реакции между металлом и шлаком зависит от температуры; исследования показали, что в шлаковой ванне имеются две температурные области. Высокотемпературная (примыкающая непосредственно к торцу электрода), в которой протекают процессы восстановления кремния и марганца из оксидов по реакциям (80), (81), и низкотемпературная область (занимающая остальной объем шлаковой ванны), в которой при сварке проволокой Св-08 происходит окисление марганца и кремния, а при сварке сварочной проволокой, содержащей много кремния, в первой области наблюдается восстановление марганца за счет окисления кремния.

При сварке под флюсом вследствие равномерного перемещения дуги вдоль свариваемых кромок плавятся и вступают во взаимодействие все новые порции металла и флюса, в результате чего при неизменном режиме сварки состав металла шва по длине практически остается одинаковым.

При электрошлаковой сварке непрерывно расплавляемый основной и электродный металлы взаимодействуют

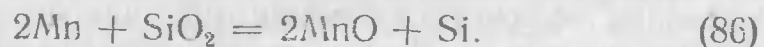
с жидким шлаком, сменность которого незначительна. В результате в начале процесса, когда жидкий металл взаимодействует с жидким шлаком первоначального состава, наблюдается переход марганца и кремния из флюса в металл, как и при сварке под флюсом. По мере протекания кремнемарганцевосстановительных процессов в шлаковой ванне происходит уменьшение концентрации оксидов кремния и марганца и накопление оксида железа (II) FeO.

Как показали опыты, после выполнения участка шва длиной 150–200 мм восстановления кремния и марганца из шлака уже не происходит. Такое быстрое накопление оксидов железа в шлаковой ванне объясняется не только кремнемарганцевосстановительными процессами, но и в значительной мере окислением шлаковой ванны кислородом воздуха по реакциям:



Последнее подтверждается тем, что при защите поверхности шлаковой ванны аргоном или азотом содержание оксида железа (II) в шлаке и окисление марганца уменьшаются. В результате реакции (84) происходит выгорание полезных примесей, и химический состав металла шва по его длине оказывается неодинаковым, что отрицательно сказывается на качестве сварных соединений.

Для сохранения постоянства химического состава по длине шва и требуемого содержания в шве марганца электрошлаковую сварку углеродистых и низколегированных конструкционных сталей производят сварочной проволокой марки Св-10Г2 под высококремнистым марганцевым флюсом. В этом случае наблюдается восстановление и переход в шов кремния из флюса за счет марганца:



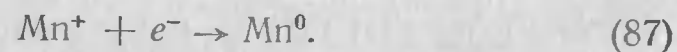
Металл получается хорошо раскисленным и достаточно однородным по длине шва.

При электрошлаковой сварке содержание фосфора и серы в металле шва невелико: фосфора потому, что основным источником его является флюс, сменность которого при электрошлаковой сварке небольшая (соответственно мало и содержание фосфора), а десульфация металла

шва при электрошлаковой сварке также протекает достаточно энергично за счет таких компонентов шлака, как MnO, CaO и CaF₂. При необходимости усилить процесс десульфации увеличивают сменность шлака путем периодического его сливания с новыми порциями флюса.

На ход металлургических процессов и химический состав металла шва при электрошлаковой сварке существенное влияние оказывает род тока и полярность подключения, потому что шлак представляет собой электролит, состоящий из ионов металла, кислорода и окислов металла.

При прямой полярности, когда электродная проволока является катодом, вследствие электролиза к поверхности образующихся капель направляются элементы и соединения, имеющие положительный заряд (положительные ионы марганца, железа и др.), и на ней создается повышенная концентрация ионов марганца, что уменьшает вероятность его окисления и перехода в шлак. Это способствует сохранению марганца в каплях электродного металла и даже повышению его содержания вследствие восстановления ионов до атомов:



В то же время к металлической ванне, являющейся анодом, направляются отрицательные ионы (кислород и кислородосодержащие соединения). Но в связи с тем, что температура ванны меньше, а удельная поверхность (т. е. поверхность, отнесенная к объему жидкого металла) значительно меньше, чем у капли на торце электрода, окисление углерода и марганца будет не столь интенсивным.

При сварке на обратной полярности к аноду (к сварочной проволоке) направляются ионы кислорода и ионы кислородосодержащих соединений, которые, попадая на более нагретую поверхность образующихся капель металла, интенсивно окисляют марганец и другие полезные примеси. Это приводит к обеднению шва марганцем, кремнием и другими элементами, повышающими прочность металла шва и его стойкость против горячих трещин, т. е. ухудшается качество шва.

При электрошлаковой сварке на переменном токе переход марганца занимает промежуточное положение по сравнению с переходом при сварке на постоянном токе прямой и обратной полярности.

Изменение основных величин режима электрошлаковой сварки значительно меньше влияет на выгорание элементов и переход их в шов, чем при дуговой сварке под флюсом.

Некоторое уменьшение окисления марганца наблюдается при повышении тока, понижении напряжения и уменьшения глубины шлаковой ванны.

Металлургические процессы при сварке в защитных газах

Из защитных газов наибольшее применение имеют инертный аргон и активный углекислый газ. Металлургические процессы при сварке сталей в этих газах существенно различаются.

При сварке под защитой инертных газов металлургические процессы протекают только между элементами, содержащими в металле сварочной ванны, так как инертные газы не взаимодействуют с газовыми и конденсированными составляющими атмосферы столба дуги.

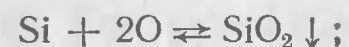
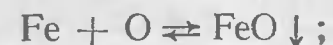
Если при сварке содержится некоторое количество оксида железа (II) FeO , то при взаимодействии с углеродом происходит восстановление FeO с образованием оксида углерода (II), нерастворимого в стали, что при кристаллизации ванны приводит к образованию пор в металле шва. Этому способствует также водород, растворимость которого в металле сварочной ванны с малой степенью окисленности высокая.

Предотвращение возможности образования пор при сварке в инертных газах достигается двумя путями:

1) введением в состав сварочной ванны таких активных раскислителей, как, например, марганец и кремний;

2) добавлением к аргону некоторого количества углекислого газа (10—15 %) или 5 % кислорода, что приводит к интенсификации процесса образования оксида углерода (II), кипению сварочной ванны; бурно выделяющиеся из нее пузырьки захватывают и выносят из ванны находящиеся в ней газы. Кислород также уменьшает поверхностное натяжение металла капли; перенос металла становится мелкокапельным, улучшаются условия формирования поверхности шва. Содержание водорода в ванне также уменьшается, так как кислород, соединяясь с водородом, образует нерастворимые в жидком металле соединения.

При сварке в углекислом газе газ оттесняет от плавильной зоны окружающий воздух и защищает расплавленный металл только от азотирования. За счет углекислого газа и кислорода, выделяющегося в высокотемпературном участке зоны сварки при диссоциации углекислого газа, металл активно окисляется по реакциям:



а на участке пониженных температур зоны сварки по реакциям:



Непрерывный уход активных раскислителей в процессе сварки и кристаллизации в атмосферу и шлак приводит к заметному уменьшению их в металле шва, поэтому при сварке в углекислом газе низкоуглеродистой стали проволокой Св-08 из-за протекания реакции окисления углерода в кристаллизационной части ванны швы получаются пористыми. Для подавления реакции образования окиси углерода (II) при сварке в углекислом газе низкоуглеродистых конструкционных сталей применяют сварочную проволоку, содержащую кремний и марганец, марок Св-08ГС, Св-08Г2С. В этом случае наплавленный металл получается хорошо раскисленным при достаточном содержании кремния и марганца и с высокими прочностными и пластическими свойствами (табл. 20). Для предотвращения порообразования за счет растворенного водорода оказывается полезной добавка в углекислый газ от 5 до 15 % кислорода. Кислород, соединяясь с водородом, растворенным в сварочной ванне, так же как и при сварке стали в инертных газах, образует нерастворимый в жидком металле гидроксил (ОН) или водяной пар (H_2O).

Кроме того, опыт некоторых заводов показывает, что добавление к углекислому газу 20—30 % кислорода изменяет характер переноса электрода металла.

Таблица 20. Химический состав и механические свойства металла, наплавленного в углекислом газе на сталь БСтЗсп

Марка проволоки	Массовое содержа- ние элементов, %			Механические свойства			
	C	Mn	Si	σ_B	σ_T	δ , %	KCU , Дж/см ²
				МПа/мм ²			
Св-08ГС	0,13	0,78	0,29	490	310	26	13,0
Св-08Г2С	0,12	0,85	0,31	510	340	25	13,6

Процесс крупнокапельного переноса переходит в мелкокапельный или струйный. При этом увеличивается глубина проплавления: коэффициент плавления — на 15 %, коэффициент наплавки — на 25 %. Такое влияние дополнительно введенного кислорода на процесс сварки в углекислом газе есть результат следующих факторов: потенциал ионизации кислорода 13,2, что приводит к увеличению эффективного потенциала в сварочной дуге и, как следствие, — к увеличению температуры столба дуги (9); кислород уменьшает поверхностное натяжение металла капли; перенос металла становится мелкокапельным, а в определенных условиях — струйным; энергичнее протекают реакции окисления марганца и кремния, что сопровождается выделением теплоты.

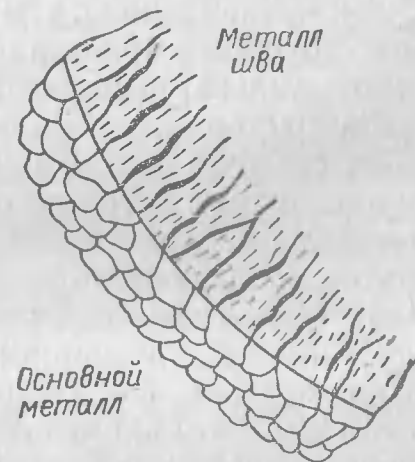
§ 20. ФОРМИРОВАНИЕ И КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛА ШВА. МИКРОСТРУКТУРА ШВА И ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ

При дуговой сварке столб дуги оказывает давление на поверхность сварочной ванны. Это давление приводит к вытеснению жидкого металла из-под основания дуги и к погружению столба дуги в основной металл и тем самым к увеличению глубины проплавления. Давление дуги, пропорциональное квадрату тока, протекающего через дугу, может быть увеличено путем повышения плотности тока.

При ручной сварке толстопокрытыми электродами на средних режимах глубина погружения столба дуги составляет 3—4 мм, а при сварке под флюсом на средних режимах 8—10 мм.

Жидкий металл, вытесняемый из головной части плавильной зоны, по мере передвижения дуги отбрасывается в ее хвостовую часть. В головной части плавильной зоны остается углубление, поверхность которого покрыта тонкой пленкой расплавленного металла, удерживаемого силами поверхностного натяжения.

По мере удаления источника теплоты в хвостовой части плавильной зоны происходит интенсивный отвод теплоты в массу холодного металла сварочной ванны, в процессе которой по границам расплавления образуются общие кристаллиты основного и наплавленного металла (рис. 56). Кристаллиты обычно растут в направлении, перпендикулярном к поверхности теплоотвода, и получают тем крупнее, чем крупнее оплавление зерна в основном металле на границе раздела с жидкой ванной.



Первичная кристаллизация металла шва, т. е. переход металла шва из жидкого состояния в твердое, так же как и кристаллизация слитков и отливок, протекает периодически, с остановками, что обусловлено периодичностью охлаждения. После охлаждения первого слоя происходит

Рис. 56. Схема роста кристаллов от границы плавления в сварочную ванну

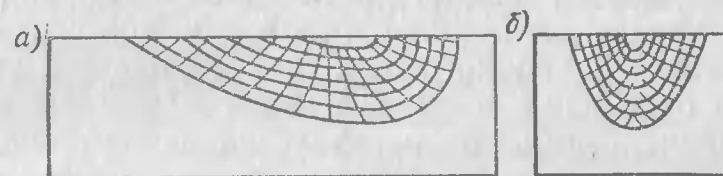


Рис. 57. Схема кристаллизации металла шва: а — вдоль сечения сварочной ванны; б — поперек сечения сварочной ванны

некоторая задержка в связи с замедленным охлаждением из-за ухудшения теплоотвода и выделения скрытой теплоты кристаллизации первого слоя.

Образовавшийся первый слой кристаллитов (для стали по перемещающейся изотермической поверхности 1500 °С) имеет форму, соответствующую поверхности теплоотвода (рис. 57). После некоторой задержки вследствие

непрекращающегося теплоотвода в глубь основного металла начинается кристаллизоваться второй слой и т. д. Так периодически и происходит кристаллизация по всему продольному и поперечному сечению металла шва.

Толщина кристаллизационных слоев может колебаться от десятых долей миллиметра до нескольких миллиметров в зависимости от объема ванны жидкого металла и условий теплоотвода. Чем сильнее теплоотвод и чем меньше объем жидкой ванны, тем меньше толщина слоя. Наибольшая толщина кристаллизационных слоев наблюдается в металле шва, выполненного электрошлаковым способом.

Закристаллизовавшийся металл однопроводного шва имеет столбчатое строение, что обусловлено тем, что в направлении отвода теплоты, т. е. перпендикулярно границе сплавления, кристаллит растет быстрее, чем в любом другом направлении.

При многослойной сварке сварные швы имеют транскристаллическую макроструктуру. Она характерна тем, что кристаллы как бы прорастают из слоя в слой. Особенно часто это проявляется, когда металл шва не претерпевает перекристаллизации при охлаждении, например у однофазных аустенитных сталей. Но если перед наложением каждого последующего слоя шва нижележащий слой подвергнуть интенсивному проковыванию, то макроструктура теряет свой транскристаллический характер.

Ось каждого кристаллита обычно не является прямой, а несколько изогнута в направлении вершины шва. Направленность роста кристаллитов зависит от формы поверхности раздела жидкого и твердого металла, которая в свою очередь зависит от режима и способа сварки. С увеличением сварочного тока глубина провара увеличивается, а отношение ширины валика к глубине провара (коэффициент формы провара) уменьшается, вследствие чего кристаллиты металла ванны будут расти от поверхности основного металла навстречу друг другу (рис. 58, а).

При изменении режима в направлении увеличения коэффициента формы провара могут создаваться условия, когда кристаллиты будут расти в направлении вершины шва (рис. 58, б). Такие швы обладают большей стойкостью против образования трещин, чем узкие швы.

Направление роста кристаллитов металла шва зависит также от интенсивности теплоотвода от поверхности сварочной ванны. Интенсивный теплоотвод с поверхности ванны, наблюдаемый при сварке плавящимся электродом

в защитном газе, создает такие условия, при которых кристаллиты растут, мало изгибаясь в направлении поверхности ванны. При сварке под флюсом отвод теплоты с поверхности сварочной ванны менее интенсивен, кристаллиты растут в направлении этой поверхности и имеют более изогнутую форму. При электрошлаковой сварке металлическая ванна, имеющая значительный объем, испы-

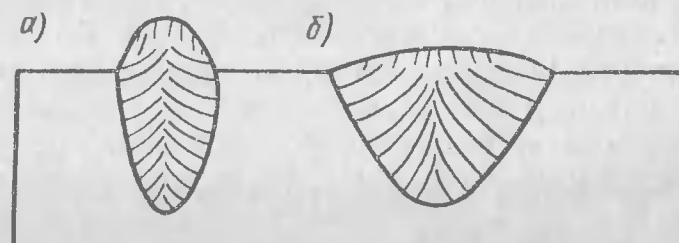


Рис. 58. Схема изменения направленности кристаллизации при малом коэффициенте провара (а) и относительно большем коэффициенте провара (б)

тывает непрерывный нагрев сверху и интенсивный теплоотвод с боков в основной металл, охлаждаемые ползуны и снизу в стороны охлаждающегося металла шва. Поэтому

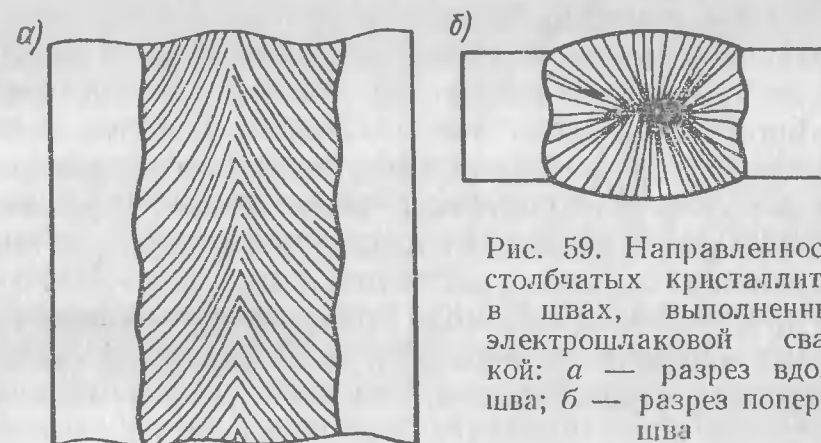


Рис. 59. Направленность столбчатых кристаллитов в швах, выполненных электрошлаковой сваркой: а — разрез вдоль шва; б — разрез поперек шва

швы, сваренные электрошлаковым процессом, характеризуются радиально-осевым направлением роста столбчатых кристаллитов (рис. 59).

Уменьшение скорости охлаждения при сварке под флюсом и электрошлаковой сварке по сравнению с ручной сваркой создает благоприятные условия для удаления газов из металла шва и всплывания шлаковых включений. В то же время при шлаковой сварке большой объем сварочной ванны и малая скорость охлаждения металла

шва приводят к значительному увеличению размеров столбчатых кристаллитов. Они настолько велики, что легко различаются невооруженным глазом. Но вследствие малого содержания газов и шлаковых включений электрошлаковые швы на углеродистых сталях имеют удовлетворительные свойства. Для измельчения структуры металла сварных швов в жидкий расплав вводят элементы-модификаторы: алюминий, титан, ванадий и др. При электрошлаковой сварке измельчить структуру можно также с помощью ультразвука или механической вибрации сварочной ванны.

Зональная и дендритная ликвация в металле шва

При кристаллизации металла шва имеет место ликвация. *Ликвацией* называют неравномерное распределение составляющих сплава, приводящих к неоднородности его химического состава. Ликвация обусловлена наличием в металле шва легирующих элементов и примесей, нерастворимых в нем или обладающих ограниченной растворимостью при температуре затвердевания — это сера, фосфор, углерод и др.

Зональная (макроскопическая) ликвация в металле шва характеризуется различием химического состава периферийной и центральной его части. Вызывается это тем, что металл периферийных зон шва, затвердевающий в первую очередь, содержит минимальное количество ликвирующих примесей. Содержание же примесей в оставшемся жидком расплаве возрастает. По мере роста кристаллитов расплав обогащается примесями, имеющими низкую температуру затвердевания, которые оттесняются в середине шва, поэтому центральная часть шва оказывается наиболее загрязненной примесями; в этой части шва возникает так называемая зона слабину шва. Она приобретает заметное развитие в нижних однопроходных швах значительного сечения.

Дендритная (внутрикристаллическая) микроскопическая ликвация характеризуется неоднородностью химического состава отдельных составляющих кристаллитов. Это имеет место вследствие того, что при затвердевании металла шва первые кристаллиты, образующие оси, а затем ветви дендритов содержат меньше примесей, чем исходный жидкий расплав. По мере роста осей и ветвей

дендрита расплав обогащается примесями, и образовавшийся кристаллит оказывается неоднородным по химическому составу: центральные и начальные части дендрита состоят из наиболее чистого твердого раствора, а междендритные пространства и особенно пограничные зоны его наиболее загрязнены.

В условиях сварки увеличение скорости охлаждения металла шва уменьшает длительность пребывания металла сварочной ванны в двухфазном состоянии, приводит к уменьшению разницы между составом твердой и жидкой фазы, в результате чего дендритная ликвация менее развита.

Процессы ликвации зависят также от температуры начала и конца кристаллизации. Чем больше этот температурный интервал, тем интенсивнее проявляются процессы ликвации. Так, для малоуглеродистой стали температурный интервал кристаллизации составляет всего 20—30 °C, поэтому значительного развития ликвация не получает. С повышением содержания углерода в стали температурный интервал кристаллизации резко возрастает, что способствует интенсивной ликвации металла. Это наряду с другими трудностями усложняет сварку сталей с повышенным содержанием углерода.

Ранее рассмотренное охватывает процессы дендритной ликвации в сплавах *при первичной кристаллизации*, но сплавы на основе железа в связи с аллотропическими превращениями в твердом состоянии при температуре, отвечающей точке A_{c3} , переходят из γ - в α -состояние, что сопровождается изменением строения шва за счет появления новых образований в пределах первичных столбчатых кристаллитов.

Изменение формы зерен при аллотропических превращениях, происходящих в твердом металле, называют *вторичной кристаллизацией*.

Характер вторичной кристаллизации металла шва зависит от его химического состава, скорости охлаждения и ряда других факторов и будет нами рассмотрен ниже при изучении особенностей сварки различных металлов и сплавов.

Микроструктура металла шва и зоны термического влияния

На свойства сварного соединения наряду с химическим составом металла шва значительное влияние оказывает структура металла шва и околошовной зоны.

В зависимости от химического состава и скорости охлаждения структура металла шва может быть самой разнообразной, поэтому рассмотрим частный случай сварки самого распространенного материала для сварных конструкций низкоуглеродистой стали с содержанием углерода до 0,2 %.

В процессе первичной кристаллизации металла шва этой стали получают столбчатые кристаллы с неоднородным химическим составом. При аллотропическом превращении железа кристаллиты распадаются, и образуется структура, состоящая из зерен феррита и небольшого количества перлита. Происходящее в результате перекристаллизации измельчение зерен оказывает благоприятное влияние на механические свойства металла шва.

Рассмотрим характерные микроструктуры металла шва, выполненного различными способами сварки на низкоуглеродистой стали. Сварной шов, выполненный тонкопокрытым электродом, имеет мелкозернистую структуру. В структуре преобладает феррит; перлита очень мало, потому что углерод, как и другие легирующие примеси, выгорает. В структуре металла имеются нитриды в виде игл или пластинок, а также оксиды и другие включения. При сварке толстопокрытыми электродами в связи с меньшей скоростью охлаждения металл шва имеет более крупнозернистую столбчатую структуру, состоящую из зерен феррита и перлита.

Хорошая защита металла при сварке и легирование его через покрытие способствуют получению достаточно чистого (без включений) металла шва заданного химического состава. Структура металла шва, выполненного под слоем флюса, имеет более грубое столбчатое строение и состоит из зерен перлита и феррита. Высокая чистота и большая однородность химического состава металла шва обеспечивают его высокие механические свойства.

Структура сварного шва заданного химического состава определяется условиями охлаждения, влияющими на процессы вторичной кристаллизации и на диффузионные процессы.

Участок основного металла, подвергшийся в процессе сварки нагреву до температуры, при которой в нем происходят изменения структуры металла, называют *околошовной зоной* (зоной термического влияния). Температура, до которой нагреваются отдельные точки околошовной зоны, изменяется от температуры плавления до

окружающей, а структура металла околошовной зоны зависит от его химического состава, теплофизических свойств и от термического цикла сварки.

Структурные изменения в околошовной зоне рассмотрим на однопроводном стыковом соединении. При этом над сечением соединения строим кривую распределения максимальных температур и в том же масштабе, рядом,

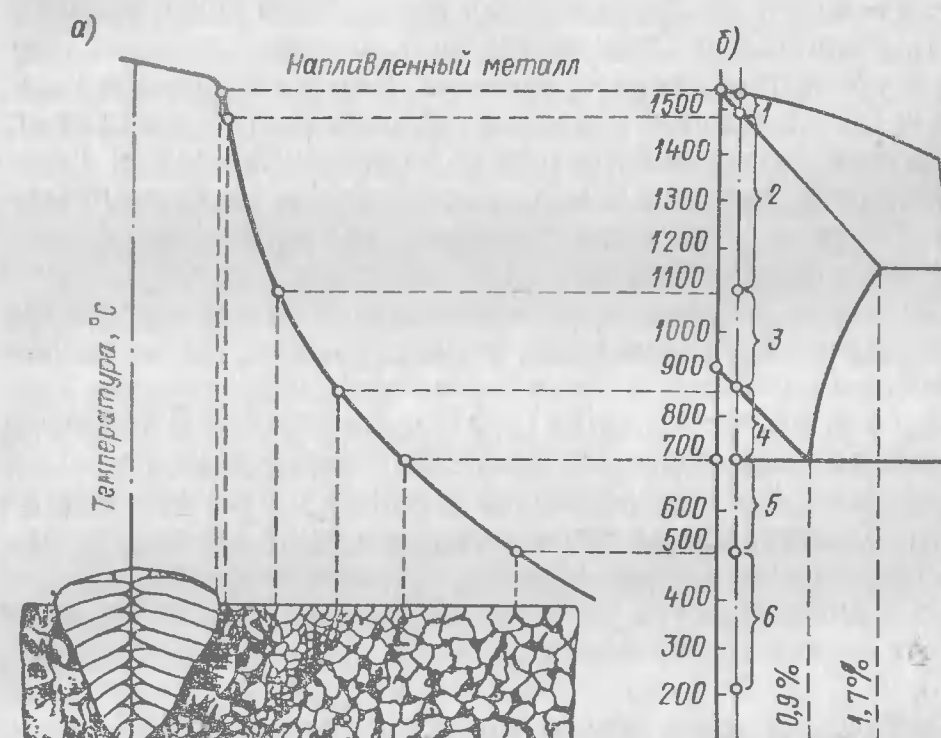


Рис. 60. Схема изменения структур околошовной зоны однопроводного шва: а — температурные границы участков околошовной зоны; б — связь их структур с диаграммой состояния сплава Fe—C

размещаем часть диаграммы железо—углерод. Проецируя с диаграммы Fe—C на сварное соединение границы участков одинаковой микроструктуры, можем с небольшой погрешностью определить в сварном соединении границы отдельных участков зоны термического влияния (рис. 60).

В зависимости от температуры нагрева и, следовательно, структурных и физико-механических изменений в околошовной зоне различают следующие участки: 1 — неполного расплавления; 2 — перегрева; 3 — нормализации; 4 — неполной перекристаллизации; 5 — рекристаллизации; 6 — синеломкости.

Участок неполного расплавления является переходным от наплавленного металла к основному, его часто назы-

вают переходной зоной; он представляет собой узкую полоску основного металла, которая при сварке находится при температурах ниже линии ликвидуса, но выше солидуса. В процессе сварки этот участок нагревается до температуры, несколько превосходящей температуру плавления, и находится в твердожидком состоянии, что способствует протеканию диффузии некоторых элементов между твердой и жидкой фазой переходной зоны; поэтому переходная зона отличается по своему химическому составу как от основного, так и от наплавленного металла.

Ширина участка неполного расплавления зависит от характера источника нагрева и состава металла и изменяется от 0,1 до 0,4 мм. Свойства этого участка оказывают подчас решающее влияние на работоспособность сварной конструкции.

Участок перегрева ограничивается температурными границами: со стороны шва температурой участка неполного расплавления, а со стороны основного металла температурой примерно 1100° С. На этом участке металл при сварочном нагреве претерпевает аллотропическое превращение из δ - в γ -железо, и в связи с тем, что металл этого участка нагревается значительно выше точки A_{c3} , наблюдается перегрев и рост аустенитного зерна.

В процессе остывания вторичная структура на этом участке зависит от состава металла и термического цикла сварки. Так, в некоторых случаях ручной сварки при значительном перегреве в сталях с повышенным содержанием углерода, а при электрошлаковой сварке даже в низкоуглеродистой стали образуется крупнозернистая видманшtedтовская структура, которая незначительно влияет на прочность металла, но заметно снижает его пластичность. Ударная вязкость при этом падает на 25 % и более.

Ширина этого участка изменяется от 1 до 3 мм.

Участок нормализации охватывает металл, нагретый в процессе сварки от температуры несколько выше критической точки A_{c3} до температуры 1100° С. На этом участке создаются благоприятные условия для образования мелкозернистой вторичной структуры. Механические свойства металла на участке нормализации обычно выше свойств основного металла, не подвергшегося нагреву при сварке. Ширина этого участка в зависимости от способа и режима сварки изменяется от 1,2 до 4 мм.

Участок неполной перекристаллизации охватывает металл, подвергшийся нагреву в интервале температур то-

чек от A_{c1} до A_{c3} . Для низкоуглеродистой стали этот интервал температур составляет немногим более 100° С (от 725 до 850° С). Металл на этом участке подвергается только частичной перекристаллизации. Поэтому здесь наряду с зернами основного металла, не изменившимися при нагреве, присутствуют зерна, образовавшиеся при перекристаллизации.

Участок рекристаллизации наблюдается при сварке стали, подвергавшейся пластической деформации. На этом участке в интервале температур 450—700° С из обломков зерен зарождаются и растут новые равноосные зерна. Если до сварки металл не подвергался пластической деформации (например, литые сплавы), процесс рекристаллизации не имеет места.

Участок синеломкости охватывает температурный интервал 200—400° С, при котором появляются синие цвета побежалости на поверхности металла. Характеризуется тем, что при сварке низкоуглеродистых сталей, содержащих более 0,005 % O_2 , 0,005 % N_2 и 0,0005 % H_2 , на участке наблюдается резкое падение ударной вязкости. Оно, вероятно, вызывается старением металла, при котором из пересыщенного твердого раствора выпадают избыточные составляющие, в данном случае азот, углерод, которые в виде тонкодисперсных нитридов и карбидов скапливаются вокруг дефектных участков кристалличе-

Т а б л и ц а 21. Средние размеры участков зоны термического влияния при различных способах сварки

Вид сварки	Средние размеры участков, мм			Общая протяженность указанных участков ЗТВ, мм
	пере-грева	норма-лизации	неполной перекристаллизации	
Дуговая сварка электродами:				
тонкопокрытыми	1,2	0,6	0,7	2,7
толстопокрытыми	2,2	1,6	2,2	6,0
Под флюсом	0,8—1,2	0,8—1,7	0,7—0,8	2,5—3,7
В среде углекислого газа	0,7—1,0	0,6—1,5	0,5—0,7	1,8—3,2
Электрошлаковая	4,0—5,0	3,0—4,0	4,0—5,0	11,0—14,0
Газовая	21	4	2	27

ской решетки, повышая таким образом прочность и снижая пластичность.

Сравнительные средние размеры участков зоны термического влияния по опытным данным для некоторых видов и способов сварки приведены в табл. 21. Размеры отдельных участков зоны термического влияния (ЗТВ) и общая ее ширина зависят от условий нагрева и охлаждения, определяемых погонной энергией сварки, толщиной и теплофизическими характеристиками свариваемого металла, а также температурой окружающей среды.

§ 21. ВЛИЯНИЕ ПОГОННОЙ ЭНЕРГИИ НА МЕТАЛЛ ОКОЛОШОВНОЙ ЗОНЫ И МЕТАЛЛ ШВА

Оценку влияния погонной энергии на основной металл производят по валиковой пробе МВТУ. Для этого из испытываемой стали, химический состав которой известен, вырезаются пластины размером $500 \times 200 \times s$ мм (s — толщина пластины). Число пластин должно быть не менее 6 шт. На каждую пластину вручную или автоматически наплавляется валик без поперечных колебаний электрода при постоянной для данного опыта энергии на 1 см шва (сечении валика). При ручной наплавке заданная скорость передвижения дуги должна сохраняться постоянной при помощи какого-либо механизма.

Погонная энергия при наплавке каждого валика на пробы должна быть в следующих пределах:

Номер режима	1	2	3
Ориентировочные значения погонной энергии, кДж/см	4,2—12,5	16,8—25,2	29,4—37,8
Номер режима	4	5	6
Ориентировочные значения погонной энергии, кДж/см	41,0—50,4	58,8—67,2	75,6—84,0

После наплавки выступающую часть наплавленного валика сострагивают заподлицо с основным металлом, и из пробы изготовляют образцы для определения KCU_n , HV , α , μ аустенитного зерна на участке перегрева.

По полученным данным строят кривые зависимости свойств основного металла от погонной энергии. Для углеродистой конструкционной стали 40 (0,40 % С, 0,70 % Мп,

0,24 % Si; 0,03 % Cr; 0,44 % Ni) такие кривые показаны на рис. 61. Из них видно, что с увеличением погонной энергии твердость околошовной зоны уменьшается, а размер аустенитного зерна на участке перегрева увеличивается.

При погонной энергии 30—40 кДж/см ударная вязкость и угол загиба имеют наибольшее значение. Уменьшение или увеличение погонной энергии по сравнению с опти-

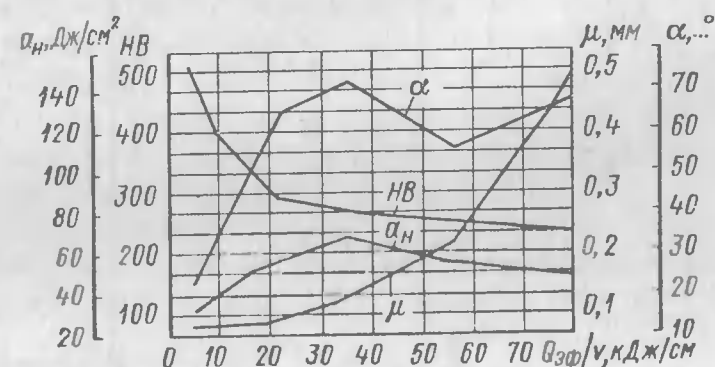


Рис. 61. Зависимость свойств основного металла (углеродистая сталь 40) от энергии сварки

мальной приводит к уменьшению этих величин. Это объясняется тем, что уменьшение погонной энергии при сохранении всех прочих начальных условий приводит к увеличению скорости охлаждения, уменьшению размера аустенитного зерна и получению менее пластичных структур в околошовной зоне. Уменьшение же ударной вязкости и угла загиба при погонной энергии выше оптимальной есть результат того, что повышенная погонная энергия приводит к замедленному охлаждению и тем самым к значительному росту аустенитного зерна в околошовной зоне, что снижает ее пластические свойства.

Влияние погонной энергии на металл шва рассмотрим для случая сварки электродами УОНИ-13/45 стыковых соединений на стали Ст3 $s = 30$ мм с различной погонной энергией (сечением валика). Одна проба выполнялась с малой (сечение прохода 30—35 мм²), а другая — с большей погонной энергией (сечение прохода 85—90 мм²) — рис. 62, а. Из полученных проб изготавливались образцы для испытания на ударную вязкость (рис. 62, б). Из графика видно, что ручная сварка стыковых соединений с большей погонной энергией приводит к заметному снижению ударной вязкости, особенно при низких тем-

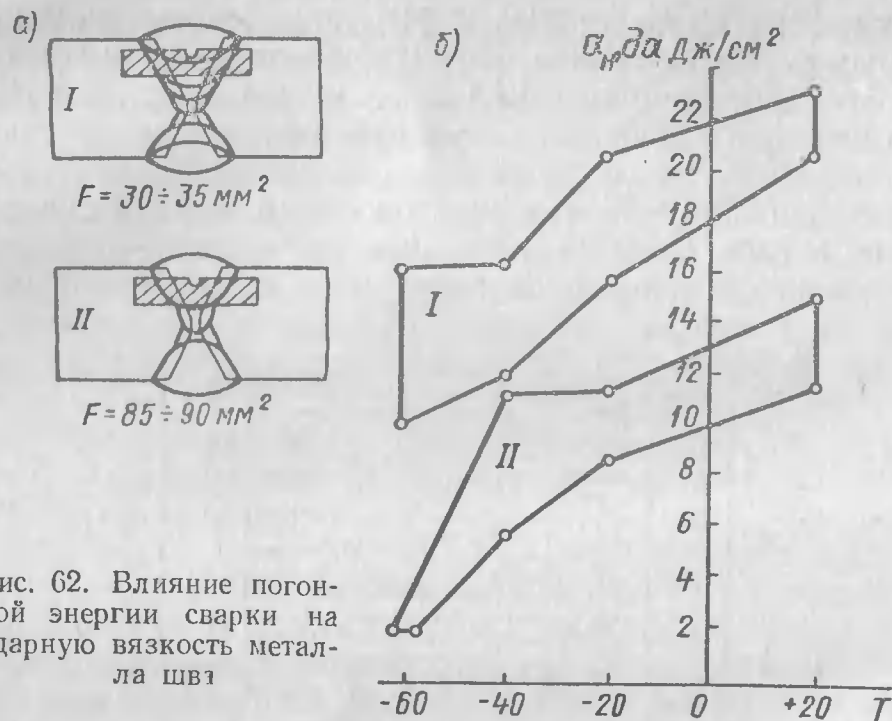


Рис. 62. Влияние погонной энергии сварки на ударную вязкость металла шва

пературах испытаний, в связи с тем, что сильнее проявляется дендритная ликвация, и структура шва получается грубой, крупнозернистой. Поэтому для получения оптимальных свойств металла шва рекомендуется производить сварку за несколько проходов с погонной энергией прохода порядка 20—30 кДж/см.

§ 22. ТРЕЩИНЫ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ СТАЛЕЙ

В зависимости от температур, при которых образуются трещины, различают два типа трещин — горячие и холодные. К горячим относят трещины, возникающие при температурах, близких к линии солидуса, а к холодным — трещины, возникающие при более низких температурах, как правило, менее 120°C . Горячие трещины проходят по границам кристаллитов и поэтому вызывают межкристаллическое разрушение металла; холодные трещины характеризуются внутрикристаллическим разрушением и пересекают как зерна, так и (иногда) границы зерен.

Наличие трещин в сварных соединениях недопустимо, поэтому рассмотрим основные причины их возникновения и меры по предупреждению трещин.

Образование горячих трещин в сварных швах связано со скоростью процесса кристаллизации, видом кристалли-

ческой структуры (крупнозернистая, мелкозернистая), степенью развития внутрикристаллической ликвации металла шва и скоростью нарастания напряжений в сварном соединении по мере снижения температур. Установлено, что в процессе нагрева источником теплоты в сварных соединениях возникают значительные пластические деформации сжатия, а при охлаждении появляются упругие напряжения растяжения, что приводит к поперечному и продольному укорочению металла в соединении. Если в процессе сварки создаются условия, при которых в металле шва во время его кристаллизации при высоких температурах возникнут деформации укорочения, превышающие его деформационную способность, то в металле шва возникнут горячие трещины. Естественно, чем более крупнозернистой будет структура металла шва, тем интенсивнее будут протекать явления зональной и междендритной ликвации и тем больше будет склонность металла шва к горячим трещинам. Химический состав металла шва оказывает решающее влияние на стойкость шва против образования горячих трещин.

Образование горячих трещин тем вероятнее, чем больше в металле элементов, способствующих образованию легкоплавких эвтектик и химических соединений, располагающихся при кристаллизации по границам зерен и затвердевающих в последнюю очередь при относительно низких температурах. Сера, углерод и другие элементы, образующие прослойки легкоплавких эвтектик, увеличивают склонность металла шва к образованию горячих трещин. Марганец повышает стойкость металла шва против образования горячих трещин, так как марганец связывает серу в тугоплавкое соединение. Это хорошо подтверждается данными о влиянии марганца на склонность к трещинам, вызываемым серой и углеродом (рис. 63). Из графика следует, что при содержании углерода 0,16 % даже при малых концентрациях серы и достаточно высоком содержании марганца в шве возникают горячие трещины, что характеризует низкую технологическую прочность такого металла.

Способность металла и ЗТВ претерпевать без разрушения упругопластические деформации при высоких температурах процесса сварки называется технологической прочностью металла при сварке.

Технологическую прочность сталей уменьшают элементы — карбидообразователи. По степени уменьшения

технологической прочности они расположены в ряд: хром, молибден, вольфрам, ванадий, титан. Это объясняется тем, что при кристаллизации тройного сплава, например железо — углерод — хром, железо — углерод — молибден и др., твердую фазу образует аустенит, а жидкая фаза, обогащаясь углеродом, затвердевает в виде эвтектики типа ледебурита при относительно низких температурах. Вероятно, эта карбидная эвтектика и создает

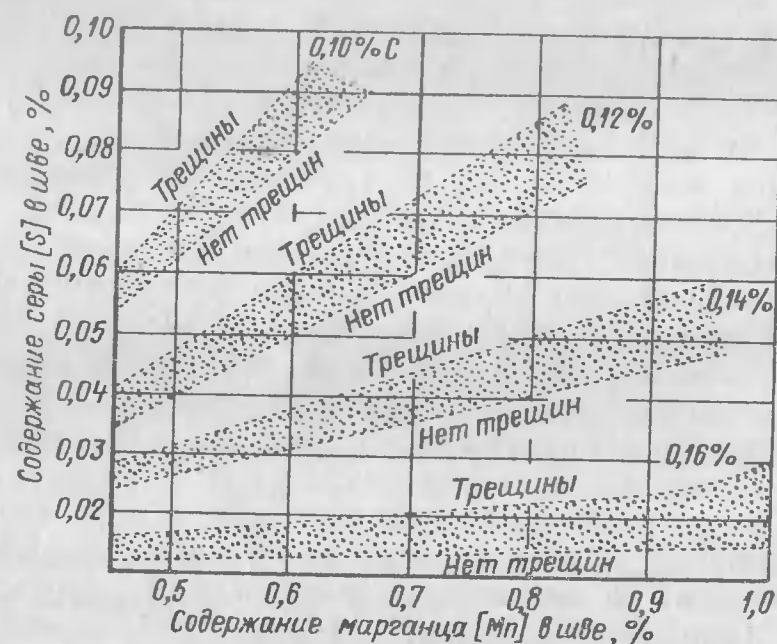


Рис. 63. Влияние марганца на склонность к трещинам, вызванным серой и углеродом

жидкие прослойки между кристаллитами, способствуя образованию горячих трещин. Образованию горячих трещин способствуют также элементы, обладающие ограниченной растворимостью в железе, и более легкоплавкие чем железо, например медь.

Из рассмотренного следует, что знание склонности того или иного металла шва к горячим трещинам является крайне важным. В настоящее время для этого разработаны различные методики.

Методика Института электросварки им. Е. О. Патона заключается в том, что на тавровом образце длиной 250—350 мм, собранном на прихватках и закрепленном в приспособлении, производится сварка углового шва «в лодочку» при точном фиксировании режима и времени сварки. По истечении определенного промежутка вре-

мени с момента прекращения сварки по кромке стенки тавра, в конце шва, наносится удар падающим грузом (работа удара 100 Н/м). Этот опыт при тех же условиях повторяют несколько раз и устанавливают время, в течение которого металл шва сохраняет способность образовывать трещины. Этот промежуток времени, выраженный в секундах, и является показателем склонности металла шва к образованию горячих трещин.

Методика МВТУ им. Баумана состоит в том, что специальный образец (рис. 64, а) в процессе сварки растя-

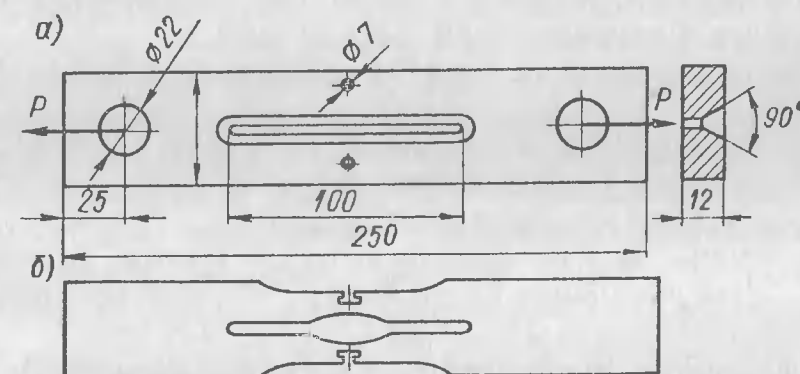


Рис. 64. Вид образца для определения склонности металла шва к образованию горячих трещин по методике МВТУ: а — размеры и вид образца сверху до испытания; б — вид образца снизу после растяжения

гивается с постоянной скоростью. Круглые отверстия в средней части образца служат для создания при растяжении образца двухосного напряженного состояния в металле шва за счет искривления силового потока и изгиба боковых частей образца (рис. 64, б). Испытания проводят на нескольких образцах при различной скорости деформации так, чтобы установить граничное значение скорости деформации, при которой в металле шва при данных условиях возникают трещины.

Скорость деформации (мм/мин), при которой в металле шва появляются трещины, и служит показателем технологической прочности.

Для уменьшения вероятности образования горячих трещин следует устранить или ослабить влияние факторов, вызывающих их, таких, как растягивающие напряжения и жидкие межкристаллитные прослойки.

Уменьшение растягивающих напряжений может быть достигнуто обеспечением более свободного укорочения ме-

талла шва и отдалением момента возникновения растягивающих напряжений — применением предварительного и сопутствующего подогрева. В этом случае уменьшается вероятность образования горячих трещин даже при более выраженной дендритной ликвации, обусловленной замедленным остыванием шва. Но все же возможности устранения трещин за счет ослабления растягивающих напряжений крайне ограничены. Поэтому чаще всего применяют технологические и металлургические меры по уменьшению склонности швов к образованию горячих трещин:

1) применение режимов сварки, обеспечивающих получение более благоприятной формы шва;

2) уменьшение доли участия основного металла в металле шва;

3) использование основного и сварочного материалов с минимальным содержанием серы, фосфора, углерода и с достаточным содержанием марганца;

4) введение в шов модификаторов (титан, алюминий и др.), измельчающих первичную структуру металла шва;

5) различные мероприятия, способные приводить к измельчению структуры первичной кристаллизации.

Холодные трещины в сварных соединениях на сталях обычно образуются в том случае, если при охлаждении аустенит околошовной зоны и металла шва переохлаждается, и превращение γ -железа в α -железо протекает достаточно быстро, завершаясь при температуре ниже 200 °С. Металл, претерпевший такой термический цикл, будет иметь тетрагональную мартенситную структуру, очень твердую и хрупкую, объем которой будет больше исходной α -структуры.

Холодные трещины являются типичными дефектами сварных соединений из средне- и высоколегированных сталей перлитного и мартенситного классов. В связи с тем, что при сварке таких сталей металл шва обычно подбирают с меньшим содержанием элементов, способствующих переохлаждению аустенита, то холодные трещины наиболее часто поражают околошовную зону, реже металл шва.

Образованию холодных трещин в закаливающихся сталях способствует не только переохлажденный аустенит, но и водород, поступающий в околошовную зону из металла шва. Характер действия водорода на образование холодных трещин рассмотрен ранее.

Холодные трещины, как правило, зарождаются по истечении некоторого времени после окончания сварки, а затем на протяжении нескольких часов и даже суток распространяются как вдоль, так и поперек околошовной зоны, а иногда и шва. Такой характер разрушения — результат совместного действия в сварном соединении тепловых, сварочных и структурных напряжений, крупнозернистого игольчатого строения мартенсита и заметного снижения пластических свойств металла в связи с растворением в нем водорода.

Предупредить образование холодных трещин в сварных соединениях можно применением предварительного и сопутствующего подогрева при сварке; использованием сварочных материалов с минимальным содержанием водородопроизводящих компонентов; выбором оптимального режима сварки и правильной последовательности наложения швов; проведением термической обработки соединения сразу же после сварки и рядом других мер (см. гл. IX).

§ 23. СТАРЕНИЕ И КОРРОЗИЯ МЕТАЛЛА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Старением металла называют процесс изменения механических свойств металла со временем. Он проявляется в повышении твердости и хрупкости металла. Если процесс старения происходит при комнатной температуре, то он называется естественным старением, а если при нагреве до определенной температуры с последующим охлаждением — искусственным старением.

Основной причиной старения металла сварных соединений является искажение кристаллической решетки металла в связи с выпадением из пересыщенного твердого раствора металла избыточных составляющих: кислорода, азота, водорода и других примесей.

Оценка склонности к старению производится как по ударной вязкости, так и по критической температуре хрупкости металла T_x . За величину критической температуры хрупкости обычно принимают наименьшую температуру, при которой ударная вязкость не снижается менее 30 Дж/см².

Коррозией называется процесс физико-химического разрушения металла под влиянием внешней среды.

Коррозионная стойкость сварных соединений в различных средах и при разных температурах имеет исключительно большое значение, так как сварные соединения часто работают в условиях, способных вызвать коррозию (растворы кислот, повышенная температура, влага, совместное действие нескольких факторов и др.).

По характеру процесса различают химическую и электрохимическую коррозию.

Химическая коррозия есть процесс окисления металла при непосредственном воздействии соприкасающейся с ней среды без появления электрического тока. Примером такой коррозии может служить окисление железа на воздухе при нагреве с образованием оксидов (окалины) на его поверхности или образование гидрооксидов железа в присутствии дистиллированной воды.

Электрохимическая коррозия характеризуется тем, что протекает в электролитах и сопровождается появлением электрического тока. В качестве электролитов могут служить кислоты, щелочи и их растворы, растворы солей в воде и вода, содержащая растворенный воздух.

Стойкость против коррозии зависит от химического состава, структуры, состояния поверхности, напряженного состояния металла, а также химического состава, концентрации, температуры и скорости перемещения агрессивной среды по поверхности металла.

Мерой коррозионной стойкости металла является скорость коррозии в данных условиях и среде, которая выражается глубиной коррозии в миллиметрах в год или в потере массы в граммах за 1 ч на 1 м² площади поверхности металла (г/м²·ч).

При эксплуатации сварных судов для восстановления лакокрасочных покрытий на днищевой части корпуса их периодически помещают в сухие доки; при этом установлено, что наружная подводная часть корпусов имеет участки корродированного металла. Анализ причин коррозии показал, что окалина, не удаленная с поверхности металла корпуса, обладая более высоким потенциалом, образует на этой части поверхности корпуса катод. В то же время участки корпуса, на которых она отсутствует, являются анодом и подвергаются коррозионному разрушению.

На поверхности сварных швов окалина отсутствует и при износе лакокрасочного покрытия металл швов, являясь анодом по отношению к окалине, подвергается

интенсивному коррозионному износу. Но наряду с этим установлено, что даже при отсутствии окалины на основном металле металл шва часто подвергается более интенсивному коррозионному разрушению, чем основной металл.

Это имеет место вследствие того, что металл шва по химическому составу отличается от основного металла, как это видно из табл. 22. Кроме того, металл шва также отличается от основного по структуре. В связи с тем, что при рассмотренных условиях металл шва является анодом, интенсивность его корродирования заметно усиливается. В ряде случаев коррозия сварных швов была столь значительна, что возникла необходимость периодической постановки судов в доки для подварки тысячи метров швов. Это приводило к большим затратам средств и времени. Установлено, что различные составляющие металла шва существенно влияют на антикоррозионную способность. Легирование металла шва соответствующими элементами производилось через покрытие.

Для повышения коррозионной стойкости сварных швов на конструкциях из низколегированных и низкоуглеродистых сталей, предназначенных для эксплуатации в морской воде или подобной среде, рекомендуется при ручной сварке ввести в металл шва 0,55 % Ni. Для этого ручную сварку следует производить электродами марки Э-138/Н50, имеющими основное покрытие и содержащими 0,7—1,1 %

Таблица 22. Химический состав металла шва, выполненного из стали 10ХСНД электродами марки УОНИ-13/45А

Исходный материал и металл шва	Массовое содержание элементов, %						
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	S P не более
10ХСНД	0,12	0,80—1,10	0,50—0,80	0,60—0,90	0,50—0,80	0,40—0,65	0,04
УОНИ-13/45А	0,11	0,18—0,35	0,35—0,65	—	—	—	0,03
Металл шва	0,10	0,4	0,58	0,33	0,3	0,24	0,028
							0,027

Ni, а автоматическую сварку под флюсом производить проволокой Св-08ГНА, содержащей 0,9—1,2 % Ni.

В связи со значительной стоимостью и дефицитностью никеля швы на стали 10ХСНД для увеличения коррозионной стойкости можно легировать 0,6—0,7 % Cr, но следует учитывать, что такое содержание хрома в металле шва на стали 10ХСНД снижает его ударную вязкость. При многопроходных швах такое содержание хрома целесообразно обеспечить только в верхнем слое шва, выполняя остальную часть шва электродами УОНИ-13/45А.

Уменьшение кремния и марганца в металле шва тоже может способствовать повышению его коррозионной стойкости.

Наряду с рассмотренными видами коррозии при сварке сталей различают еще межкристаллитную (структурную) коррозию.

Межкристаллитной коррозией называется процесс физико-химического разрушения металла по границам кристаллитов (зерен) под действием агрессивной среды, при котором агрессивная среда проникает в глубь металла по границам зерен, нарушая металлическую связь между зернами. Приложение даже незначительной нагрузки к такому металлу приводит к его разрушению по границам зерен. Межкристаллитной коррозии в наибольшей степени подвержены аустенитные коррозионно-стойкие стали, но это может иметь место и в высокохромистых сталях, а также швах ферритного, полужерритного и мартенситного классов.

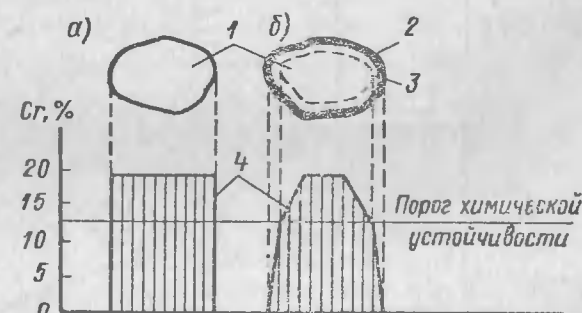
Аустенитные стали, например, сталь 12Х18Н9Т, приобретают склонность к межкристаллитной коррозии после относительно длительного нагрева в интервале температур 450—850 °С. Эта склонность зависит от большого числа факторов и особенно от химического состава стали, продолжительности ее пребывания при критических температурах.

Влияние углерода на коррозионную стойкость стали типа 18—9 начинает сказываться при его содержании более 0,02—0,03 %. Однако это критическое содержание может быть повышено при уменьшении времени выдержки при критических температурах или же более высокой скорости нагрева и охлаждения.

Из всех существующих теорий о причине межкристаллитной коррозии аустенитных сталей наиболее вероятной является теория о выделении карбидов хрома по грани-

цам зерна, сопровождающимся обеднением хромом участков металла, прилегающих к границам зерна. Аустенит в высоколегированной аустенитной стали представляет собой твердый раствор хрома, никеля, марганца, углерода и других элементов в железе. Углерод обладает ограниченной растворимостью в аустените; при комнатной температуре стабильное содержание углерода в твердом растворе аустенита не превышает 0,02—0,03 %. При более высоком содержании углерода в стали и быстром ее охлаждении (закалке) он фиксируется в аустените в виде

Рис. 65. Схема распределения хрома по зерну аустенитной стали, склонной к межкристаллитной коррозии: а — в стабилизированном состоянии (отсутствие коррозии); б — после нагрева в критическом интервале температур и при воздействии агрессивной среды (наличие коррозии):



1 — условная форма аустенитного зерна; 2 — карбиды хрома на границах зерна; 3 — обедненные хромом пограничные участки; 4 — линии распределения хрома по аустенитному зерну

пересыщенного нестабильного твердого раствора. При этом сталь невосприимчива к межкристаллитной коррозии (рис. 65).

Однако последующий нагрев металла в интервале критических температур приводит к выделению избыточного углерода из твердого раствора на границе зерен в виде карбидов хрома Cr_4C .

В результате выделения богатых хромом карбидов содержание хрома в пограничных слоях аустенитных зерен падает ниже 12 % и оказывается недостаточным для сохранения коррозионной стойкости в условиях воздействия агрессивных сред. Разное содержание хрома в самом зерне и его пограничном слое при действии агрессивной среды (электролита) приводит к появлению гальванических микропар, где само зерно служит катодом, а обедненные хромом пограничные слои — анодом, который корродирует, вызывая на этих участках зерна процесс интенсивной межкристаллитной коррозии.

На рис. 66 приведена зависимость межкристаллитной коррозии стали от температуры и времени. Кривая иллюстрирует зависимость между температурой нагрева свар-

ных соединений стали типа 18—9 и склонностью их к межкристаллитной коррозии. Как следует из этой зависимости, по мере повышения температуры нагрева стали до 730 °С критическое время приобретения сталью склонности к межкристаллитной коррозии сокращается от нескольких часов до долей минуты. При достижении 800—850 °С восприимчивость к межкристаллитной коррозии вообще не наступает. Это объясняется различными ско-

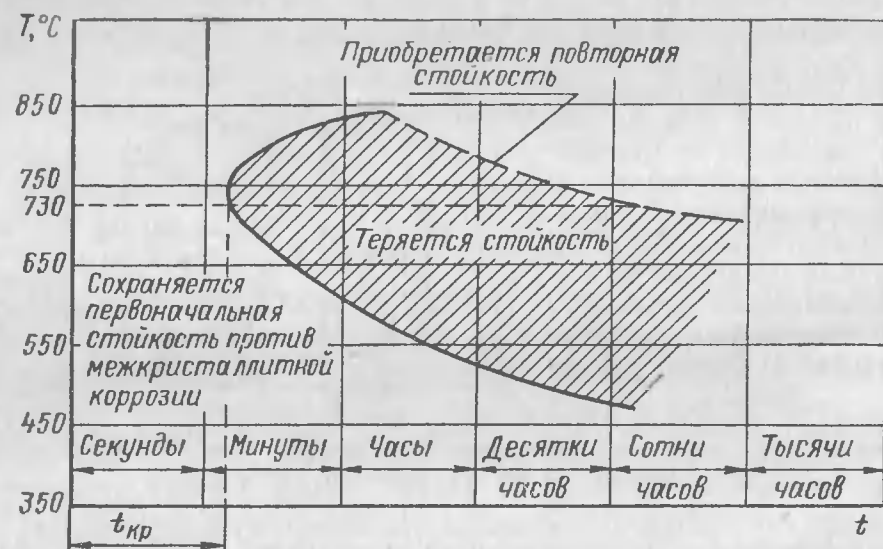


Рис. 66. Зависимость склонности аустенитной стали к межкристаллитной коррозии от температуры и продолжительности нахождения этой стали при данной температуре: $t_{кр}$ — время минимальной устойчивости аустенита

ростями протекания двух взаимно противоположных процессов — выделения карбидов хрома и диффузии хрома из центральной части зерна аустенита к его периферии. По мере повышения температуры от 450 до 730 °С скорость выпадения углерода из пересыщенного раствора и образование карбидов хрома протекают быстрее, чем скорость диффузии хрома. Вследствие этого сталь за более короткое время становится чувствительной к межкристаллитной коррозии. Дальнейшее повышение температуры от 730 до 850 °С приводит ко все большему ускорению диффузии хрома даже из центральных участков зерен аустенита, и местное обеднение хромом пограничных участков зерен протекает не так быстро, как при более низких температурах. Кроме того, при этих температурах уже сказывается процесс коагуляции и растворения карбидов в аустените. По этой же причине более длительная выдержка

стали при данной температуре приводит к восстановлению временно утерянной стойкости против межкристаллитной коррозии (штриховая линия), а при температуре 850 °С и выше восприимчивость к межкристаллитной коррозии вообще не наступает.

Увеличение содержания углерода в аустенитных сталях будет интенсифицировать процесс образования карбидов хрома, и склонность к межкристаллитной коррозии будет возрастать. В меньшей степени на склонность к межкристаллитной коррозии влияют элементы-аустенизаторы: никель и азот; при увеличении содержания этих элементов в аустенитных сталях для уменьшения склонности стали к коррозии следует уменьшить в ней содержание углерода.

Увеличение концентрации хрома в аустенитной стали уменьшает степень обеднения хромом пограничных участков и увеличивает стойкость стали против коррозии. Введение в сталь молибдена увеличивает стойкость стали против коррозии, так как он тормозит процесс выделения карбидов хрома, а также потому, что является активным ферритизатором. А стали с аустенитно-ферритной структурой (3—5 % феррита) менее склонны к межкристаллитной коррозии, чем чисто аустенитные, так как при этом наблюдается измельчение зерна и возрастание количества зерен в металле, что приводит к увеличению общей протяженности поверхности зерен, и количество углерода, выделяющегося в виде карбидов, становится значительно меньше.

Феррит содержит больше хрома, чем аустенит, поэтому, несмотря на обеднение хромом при выделении карбидов, в феррите еще остается достаточно хрома, чтобы противостоять межкристаллитной коррозии. Ферритные зерна располагаются внутри аустенитных зерен, а небольшая часть их — по границам, что препятствует воздействию агрессивной среды на границы зерен аустенита.

Титан и ниобий входят в аустенитные стали для подавления вредного влияния углерода. Эти элементы, обладая большим сродством к углероду, чем хром, образуют карбиды (TiC , NbC), предотвращая образование и выделение карбидов хрома Cr_4C . Необходимое содержание титана и ниобия в стали составляет:

$$Ti = (5 \div 6) C; \quad (88)$$

$$Nb = (8 \div 10) C, \quad (89)$$

где C — содержание углерода в аустенитной стали.

Титан и ниобий являются активными ферритизаторами, и это также будет способствовать уменьшению склонности к межкристаллитной коррозии.

Для установления микроструктуры металла шва хромоникелевой стали можно пользоваться структурными диаграммами.

В результате длительных исследований удалось установить эффективность действия на структуру сварного

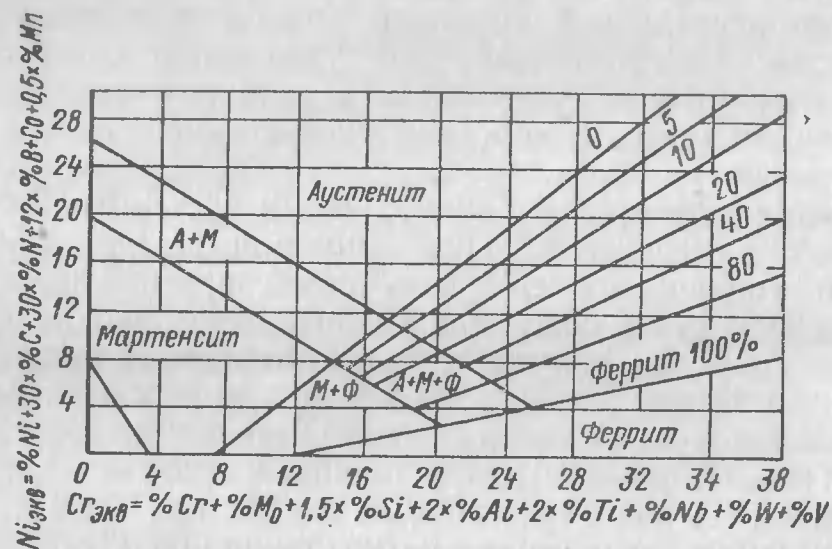


Рис. 67. Структурная диаграмма сварных швов (по Шеффлеру)

шва того или иного элемента по сравнению с действием основных легирующих примесей аустенитных сталей: основного ферритообразующего элемента хрома и основного аустенитообразующего элемента никеля. На основании полученных данных, приняв действие основных элементов за единицу, построили структурную диаграмму Шеффлера для сварных швов (рис. 67), где по ординате приведен эквивалент никеля, а по абсциссе — эквивалент хрома.

Эффективность влияния ряда других элементов, указанных в приводимых на рис. 67 эквивалентных значениях никеля и хрома, и эквивалентное их содержание может определяться по формулам:

$$Cr_{\text{экв}} = Cr + Mo + 1,5Si + 2Al + 2Ti + Nb + W + 0,5V; \quad (90)$$

$$Ni_{\text{экв}} = Ni + 30C + 30N + 12B + Co + 0,5Mn \quad (91)$$

(содержание элементов дано в процентах).

Рассчитав эквивалентные концентрации хрома и никеля по структурной диаграмме, можно установить тип микроструктуры сварного шва и приблизительно оценить количество ферритной составляющей в ней, что имеет большое значение для установления степени склонности металла к межкристаллитной коррозии и кристаллизационным трещинам.

Пример. Определить микроструктуры наплавленного металла электродами марки КТИ-5-62, если химический состав шва следующий: 0,11 % С; 0,4 % Si; 3,2 % Mn; 19,2 % Cr; 11,5 % Ni; 2,2 % Mo; 0,42 % V; 0,02 % S; 0,03 % P.

Определяем эквивалентное значение Cr и Ni по формулам (90) и (91):

$$Cr_{\text{экв}} = 19,2 + 2,2 + 1,5 \cdot 0,4 = 22;$$

$$Ni_{\text{экв}} = 11,5 + 30 \cdot 0,11 + 0,5 \cdot 3,2 = 16,4.$$

По оси координат откладываем значения эквивалента $Ni_{\text{экв}}$, а по абсциссе — эквивалентное значение $Cr_{\text{экв}}$, точка пересечения перпендикуляров этих точек и будет характеризовать микроструктуру наплавленного металла — в данном случае аустенит плюс 2 % феррита.

ГЛАВА V. СВАРОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ

§ 24. СВАРОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ, ДЕФОРМАЦИИ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

Сварка, как и другие процессы обработки металлов (штамповка, литье, термическая обработка), вызывает возникновение в изделиях собственных напряжений. Собственными напряжениями называются напряжения, которые существуют в изделии без приложения внешних сил. Поэтому в самый начальный период создания сварных конструкций, при их проектировании, необходимо считаться с возможностью появления в них значительных остаточных деформаций и напряжений, которые могут изменить проектные формы и размеры. В тех случаях, когда изменение размеров конструкции выходит за пределы допустимых, приходится применять специальные меры по предотвращению или уменьшению остаточных сварочных деформаций и напряжений. Для этого необходимо знать систему их классификаций и основные законы их возникновения. В зависимости от причины, вызвавшей напряжения, различают:

1) тепловые напряжения, вызванные неравномерным распределением температуры при сварке;

2) структурные напряжения, возникающие вследствие структурных превращений, сопровождающихся переохлаждением аустенита в околошовной зоне и образованием продуктов закалки мартенсита, объем которого больше объема исходной структуры.

Структурные напряжения не могут существовать при отсутствии тепловых напряжений, тогда как тепловые могут существовать при отсутствии структурных (как, например, в малоуглеродистых сталях).

В зависимости от времени существования собственных напряжений и деформаций различают:

1) временные (переменные) — существующие в конструкции лишь в определенный момент времени. Если при этом возникшие напряжения не превысят предела упругости, временные напряжения и деформации исчезают после охлаждения изделия;

2) остаточные — остаются в изделии после исчезновения причины, их вызвавшей. Эти напряжения и деформации также возникают вследствие неравномерного нагрева. Но при этом в отдельных объемах нагреваемого изделия должны иметь место термопластические деформации или структурные превращения с образованием продуктов закалки.

В зависимости от размеров области, в пределах которой имеют место и взаимно уравниваются внутренние напряжения, различают:

1) напряжения первого рода, которые действуют и уравниваются в крупных объемах, соизмеримых с размерами изделия или отдельных его частей. Эти напряжения могут быть определены экспериментально или расчетным путем;

2) напряжения второго рода — уравниваются в микрообъемах тела в пределах одного или нескольких зерен металла, не имеют определенной ориентировки и не зависят от формы изделия. Напряжения второго рода определяются рентгеноструктурным анализом;

3) напряжения третьего рода — уравниваются в объемах, соизмеримых с атомной решеткой, и связаны с искажением атомной решетки; возникают они, например, при образовании растворов внедрения; определяются рентгеноструктурным анализом.

К напряжениям первого рода относятся, как правило, внутренние напряжения, вызванные неравномерным нагревом и остыванием, либо неравномерной пластической деформацией. Поэтому сварочные напряжения и являются напряжениями первого рода. Они более подробно изучены и являются предметом рассмотрения в данной главе.

По направлению действия напряжений и деформаций различают продольные напряжения вдоль (параллельно) оси шва — рис. 68 и поперечные напряжения поперек (перпендикулярно) оси шва — рис. 68.

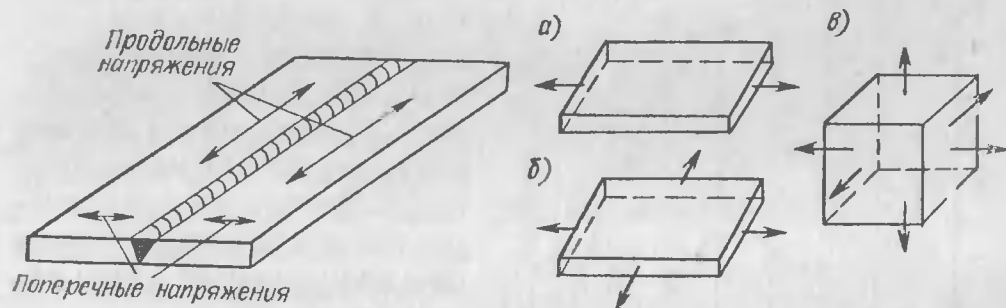


Рис. 68. Направление действия продольных и поперечных напряжений

Рис. 69. Различные виды напряженного состояния

По виду напряженного состояния сварочные напряжения делятся:

1) на линейные (одноосные), действующие только по одной оси в одном направлении — рис. 69, а;

2) плоскостные (двухосные), действующие в двух направлениях — рис. 69, б;

3) объемные (трехосные), действующие в трех направлениях — рис. 69, в.

В зависимости от изменения при сварке форм и размеров детали или изделия различают:

1) деформации в плоскости — проявляются в изменении формы и размеров детали или конструкции в их плоскости. Они могут быть продольными, поперечными и изгиба;

2) деформации из плоскости (угловая деформация) — проявляются в образовании поперечных или продольных волн, изломов плоскости свариваемых листов или элементов изделия, в грибовидном изгибе пояса при сварке тавровых и двутавровых сечений и других изменениях формы детали. Вопросы напряжений и деформаций при

сварке в значительной мере изучены в работах проф. д-ра техн. наук Н. О. Окерблома. Основные положения теории сварочных деформаций изложены ниже.

§ 25. СХЕМА ОБРАЗОВАНИЯ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ

Сварка металлов протекает в широком интервале температур. При этом интенсивному нагреву подвергаются шов и околошовная зона, а удаленные от шва участки могут вовсе не подвергаться нагреву.

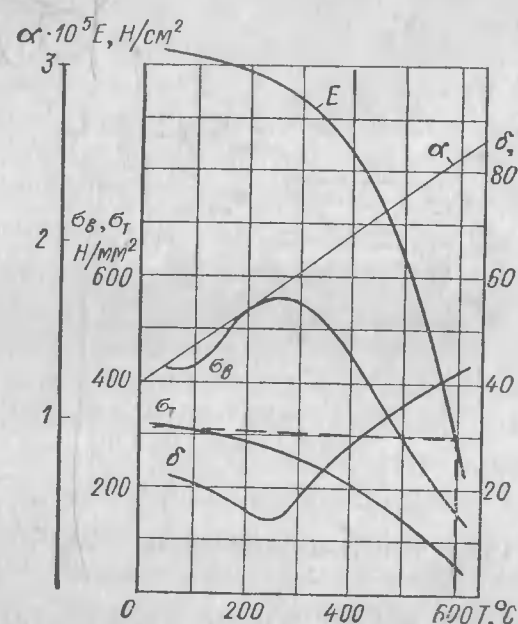


Рис. 70. Изменение свойств низкоуглеродистой стали в зависимости от температуры

Нагрев приводит к изменению как физических, так и механических характеристик металла, с чем при сварке необходимо считаться. Поэтому рассмотрим, как изменяются свойства низкоуглеродистой стали в зависимости от температуры испытания (рис. 70). Как видно из графика, предел прочности стали до температуры 100 °C меняется незначительно, в интервале температур 200—350 °C он достигает максимума, превышающего начального значения на 20—30 %, относительное удлинение в этом интервале температур падает. Повышение прочности при понижении пластичности может иногда явиться причиной образования трещин в металле. Модуль упругости стали при повышении температуры падает, и при температуре около 650 °C сталь утрачивает свои упругие свойства. Коэффициент линейного теплового расширения α с повышением температуры возрастает. Предел текучести с повышением температуры снижается, и в дальнейшем будем считать, что при температуре 600 °C предел текучести имеет нулевое значение. Но обычно при рассмотрении напряжений и деформаций при сварке зависимость между пределом текучести и температурой принимают, как показано штриховой линией на рис. 70.

Изучение напряжений и деформаций в сварных соединениях начнем с анализа процессов при равномерном нагреве и охлаждении массивных стержней с разной степенью закрепления.

Деформации и напряжения при равномерном нагреве

Процессы будут рассматриваться в координатных осях: время t — по абсциссе, а температура T °C и относительные деформации λ — по ординате. При равномерном нагреве свободно лежащего стержня удлинение будет прямо пропорционально температуре (рис. 71). (Коэффициент α принимаем не зависящим от температуры.) С течением времени t будет изменяться и относительное тепловое удлинение λ ; его можно определить так:

$$\lambda = \Delta l / l = \alpha T. \quad (92)$$

Наибольшее удлинение стержень получит в момент достижения им наивысшей температуры, но напряжений в нем возникать не будет. Если после нагрева его охладить, то по мере уменьшения температуры будут уменьшаться удлинения, и при начальной температуре его удлинение будет равно нулю. По завершении термического цикла в стержне не будет ни напряжений, ни остаточных деформаций.

В случае равномерного нагрева стержня, упирающегося концами в жесткие стенки (рис. 72, а), по мере повышения температуры в нем появятся напряжения сжатия и упругие деформации сжатия, пропорциональные αT . До момента времени t_1 и температуры T_1 , пока αT будет меньше или равно пределу текучести, процессы в стержне будут обратимые. Но при дальнейшем повышении температуры (выше T_1 , когда напряжения превзойдут предел текучести), кроме упругих деформаций сжатия в стержне появятся пластические деформации сжатия, по величине равные общим тепловым деформациям за вычетом упру-

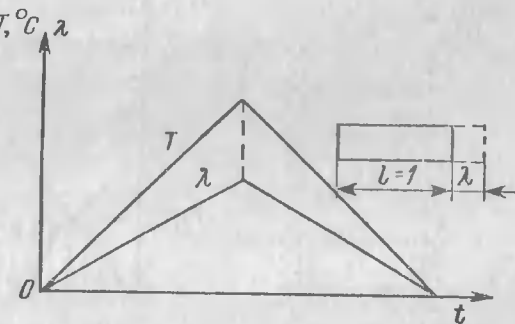


Рис. 71. Изменение размеров незакрепленного стержня при изменении температуры

гих, объем которых будет увеличиваться по мере роста температуры.

Если после нагрева стержня до некоторой максимальной температуры T_2 в момент времени t_2 начнется его охлаждение, то в нем по линии mn будут уменьшаться напряжения сжатия и упругие деформации сжатия, которые в момент времени t_3 и температуры T_3 будут равны нулю, и дальнейшее незначительное уменьшение температуры приведет к потере контакта между стержнем и стенками, он из них выпадет и дальнейшее снижение температуры

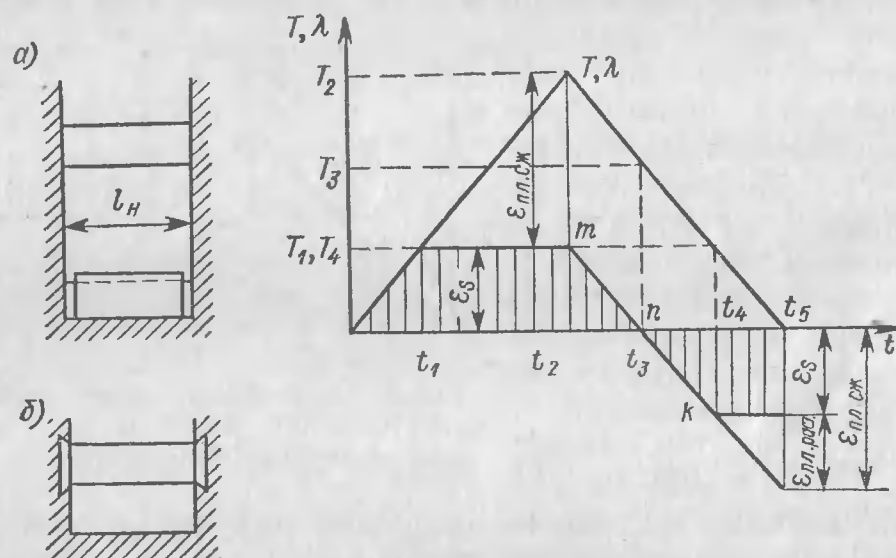


Рис. 72. Изменение деформаций и напряжений при нагреве и охлаждении стержней

приведет к соответствующему укорочению стержня. По завершении термического цикла в стержне напряжений не будет, но он укоротится на $\Delta l = \alpha T_3 l$.

В случае равномерного нагрева жестко закрепленного стержня (рис. 72, б) все процессы до момента времени t_3 будут подобны ранее рассмотренному. Но при уменьшении температуры ниже T_3 укорочение стержня произойти не сможет, поэтому в нем появляются напряжения растяжения, возрастающие по линии nk по мере уменьшения температуры до T_4 и момента времени t_4 , когда они достигнут предела текучести растяжения, дальнейшее охлаждение вызовет в стержне пластические деформации растяжения, которые будут увеличиваться до достижения стержнем начальной температуры в момент времени t_5 . По завершении термического цикла в стержне будут существовать остаточные напряжения, равные пределу

текучести растяжения, большие пластические деформации сжатия, а также небольшие пластические деформации растяжения. Если же стержень освободить от закрепления, то он, сохраняя начальный объем, увеличится по диаметру и сократится по длине, и напряжений в нем не будет. Относительное укорочение может быть определено по формуле $\epsilon_s = \sigma_T / E$.

Следовательно, нагрев и охлаждение жестко заделанного стержня выше температуры, при которой напряжения превосходят предел текучести, приводят к появлению в нем напряжений, равных пределу текучести растяжения и пластических деформаций сжатия и растяжения, первые из которых по объему значительно превосходят вторые, что и приводит к заметным укорочениям свариваемых деталей и изделия в целом после сварки. Температура, при которой в жестко закрепленном стержне из стали марки Ст3 возникают напряжения, равные пределу текучести сжатия, может быть определена по уравнению

$$\sigma_T = \epsilon E. \quad (93)$$

Зная, что $\epsilon = \Delta l / l$; $\Delta l = \alpha T l$, подставим полученное в уравнение (93). Тогда

$$\sigma_T = \alpha T E, \text{ а } T = \sigma_T / \alpha E. \quad (94)$$

Подставив в правую часть уравнения значения коэффициентов, получим

$$T = \frac{2400}{1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 2 \cdot 10^6} = \frac{2400}{24} = 100^\circ \text{C}.$$

Из этого следует, что нагрев жестко заделанного элемента из стали марки Ст3 выше 100°C приводит к появлению в нем напряжений, равных пределу текучести сжатия. Как ранее отмечалось, весь термический цикл нагрева и охлаждения вызывает появление напряжений растяжения, равных пределу текучести. Подобные условия жесткого закрепления на практике встречаются довольно часто, например при холодной заварке трещин в массивном изделии и сварке двух жестко закрепленных деталей встык. Поэтому, естественно, возникает вопрос, не могут ли остаточные напряжения, равные пределу текучести растяжения, достигнуть предела прочности материала, т. е. вызвать разрушение — разрыв стержня. Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим диаграмму растяжения для двух образцов: одного пластичного, из низкоуглеродистой стали, другого — малопластичного, из закаленной стали

или чугуна (рис. 73). Как видно из рисунка, кривая 2 резко отличается от кривой 1. Определим относительное укорочение ϵ , которое должен претерпеть равномерно нагретый жестко закрепленный стержень при охлаждении от 600°C (когда упругие свойства считаем равными нулю) до 0°

$$\epsilon = \alpha T = 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 600 = 0,0072 = 0,72 \%$$

Сопоставляя полученное относительное укорочение для жестко закрепленного образца (по завершении термического цикла) — $0,72\%$ — с относительным удлинением, соответствующим границе площадки текучести, отмеченной точкой c (рис. 73), равным для пластичной стали $2-3\%$, видим, что это укорочение образца значительно меньше деформаций, определяемых площадкой текучести. Если учесть, что разрушение образца из пластичной стали происходит при $\Delta l/l = 20-24\%$, то станет очевидным, что при охлаждении образца используется только незначительная часть общего запаса его пластичности, поэтому ожидать его разрыва нет оснований.

Рис. 73. Диаграмма растяжений пластичной стали (1) и хрупкого чугуна (2)

В то же время жестко закрепленный стержень из непластичного материала, претерпевая подобный термический цикл, может разрушиться, так как такой образец при растяжении не только не имеет площадки текучести (рис. 73, кривая 1), но и общий запас деформационной способности его является слишком малым. Это создает определенное затруднение при сварке хрупких материалов и требует применения специальной технологии.

Деформации и напряжения при неравномерном нагреве

Процессы, наблюдаемые при неравномерном нагреве, рассмотрим для случая наплавки валика быстро перемещающейся дугой на кромку полосы, допуская при этом некоторые упрощения:

1) действительное распределение температуры при наплавке (рис. 74, а) с небольшой погрешностью принимаем по схеме (рис. 74, б);

2) зависимость предела текучести от температуры примем, как показано штриховой линией на рис. 72;

3) полосу по ширине можно разбить на две части: на полосу I, равномерно нагреваемую при наплавке валика и ограниченной изотермой 600°C , и полосу II, остающуюся холодной, полагая при этом, что они могут быть и не связаны между собой. (Отношение ширины полосы I к полоске II принимаем примерно равной $0,25$.) Тогда при наплавке валика на кромку полосы I, полагая ее не связанной с полоской II

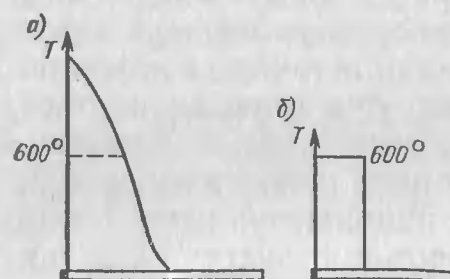


Рис. 74. Распределение температуры при наплавке валика на кромку полосы: а — действительное; б — схематизированное

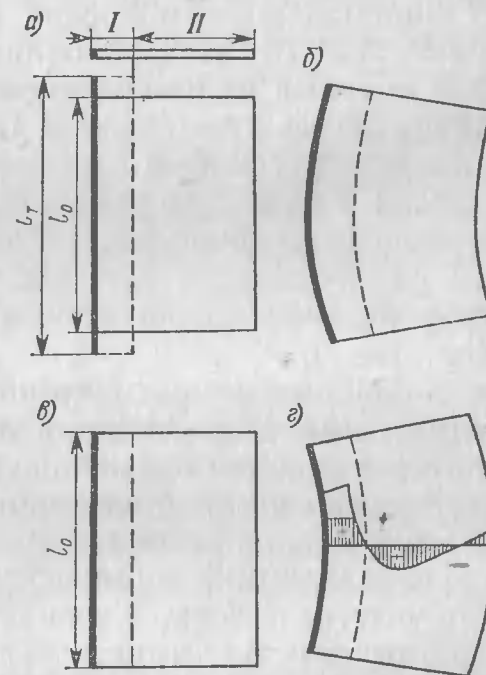


Рис. 75. Схема развития деформаций и напряжений при наплавке валика на кромку полосы

(рис. 75, а), и при нагреве ее до температуры T она удлинилась бы, и ее длина оказалась бы равной

$$l_T = l_0 (1 + \alpha T),$$

где α — коэффициент линейного расширения. Длина полосы II при этом осталась бы неизменной.

Но так как нагреваемая полоска I и полоска II связаны между собой, то удлиняясь, полоска I заставит удлиняться прилегающие к ней волокна полосы II за счет ее изгиба и растяжения. Это вызовет упругие напряжения сжатия в полоске I и реактивные упругие напряжения растяжения в полоске II.

До тех пор, пока напряжения сжатия в полоске I будут увеличиваться, оставаясь меньше предела текучести, изгиб полосы II будет увеличиваться (рис. 75, б). В момент, когда температура полоски I достигнет 600 °С, при которой предел текучести будет равен нулю, под действием сжимающих напряжений полоски II полоска I претерпит пластическую деформацию сжатия: станет толще и примет начальную длину.

Напряжения в полосках I и II при этом будут равны нулю (рис. 75, в). При охлаждении полоски I от 600 °С до 0, полагая ее не связанной с полоской II, она укоротилась бы до $\Delta l = \alpha l_0 600$. Но так как полоски I и II связаны между собой, то по мере уменьшения температуры полоска I будет укорачиваться и за счет сопротивления ее укорочению полоски II в ней будет возникать напряжение растяжения, а в полоске II — напряжение сжатия, под действием которых будет наблюдаться изгиб полосы (рис. 75, г).

В какой-то момент времени, при охлаждении полоски I напряжения растяжения в ней достигнут предела текучести растяжения и в ней начнутся пластические деформации растяжения, объем которых будет увеличиваться по мере ее охлаждения.

По завершении термического цикла полоска изогнется, и на участке полоски I возникнут напряжения растяжения и остаточные пластические деформации сжатия, а в полоске II — остаточные напряжения сжатия.

Учитывая, что в состоянии равновесия сумма всех напряжений равна нулю, эпюра продольных напряжений, принимая ширину полосы примерно 150 мм, примет вид (рис. 75, г).

§ 26. РАСЧЕТ СВАРОЧНЫХ ОСТАТОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

В сварных деталях и изделиях в процессе сварки под действием неравномерного нагрева основного металла и структурных превращений в зоне термического влияния возникают упругие и пластические деформации, нарушающие заданные размеры конструкции и в некоторых случаях вызывающие образование трещин в металле шва и околошовной зоне.

Остаточные деформации можно в значительной степени уменьшить, если правильно разработать технологический

процесс сварки и правильно наметить способы борьбы со сварочными деформациями.

Для этого необходимо четко представлять себе механизм возникновения остаточных деформаций и разбираться в приближенных расчетных методиках определения остаточных деформаций, разработанных Н. О. Окербломом, который для расчетов рекомендовал пользоваться следующими формулами:

а) для определения относительной деформации продольной оси элемента (полосы) $\Delta_{ц.т.}$, проходящей через центр тяжести ее сечения,

$$\Delta_{ц.т.} = 0,83 \cdot 10^{-6} q_n / F, \quad (95)$$

где q_n — погонная энергия, Дж/см; F — площадь сечения валика, мм;

б) для определения кривизны элемента (полосы) c , 1/см

$$c = 0,83 \cdot 10^{-6} \frac{q_n Z}{J}, \quad (96)$$

где Z — расстояние от оси полосы до центра тяжести площади, характеризующей местные деформации (до оси нагрева), см; J — момент инерции поперечного сечения элемента (полосы), см⁴; для частного случая, когда деталь в сечении имеет форму прямоугольника,

$$Z = b/2; \quad (97)$$

$$J = sh^3/12, \quad (98)$$

где s — толщина полосы, см; h — высота полосы, см; b — ширина полосы, см;

в) для определения остаточных укорочений ΔL , см

$$\Delta L = \Delta_{ц.т.} L, \quad (99)$$

где L — общая длина элемента (полосы), см;

г) для определения стрелы прогиба элемента (полосы), см

$$f = cL^2/8. \quad (100)$$

Закономерность возникновения деформаций и расчетные формулы получены при неравномерном местном нагреве кромки полосы. Однако они сохраняются и при сварке двух полос разной ширины линейным источником теплоты. Кроме того, установленные соотношения могут быть использованы для определения деформаций любых сечений при любом расположении валика и при приме-

нении материалов с физическими свойствами, отличающимися от стали. Эти изменения свойств следует учитывать.

Пример. Определить укорочение и стрелу прогиба тавровой балки из низкоуглеродистой стали (рис. 76) от сварки поясного шва.

1. По заданным размерам поперечного сечения находим необходимые для расчета величины: площадь сечения балки F , ординату центра тяжести Z , момент инерции J :

$$F_{\perp} = 10 \cdot 1 + 12 \cdot 1 = 22 \text{ см};$$

$$Z = \frac{h_{\text{ст}} - h_{\text{п}}}{4} = \frac{120 - 10}{4} = 27,5 \text{ мм} = 2,75 \text{ см};$$

$$J = J_x + J_y = \frac{1 \cdot 12^3}{12} + 10 \cdot 1 \cdot 3,25^2 + \frac{1 \cdot 10^3}{12} = 324,6 \text{ см}^4.$$

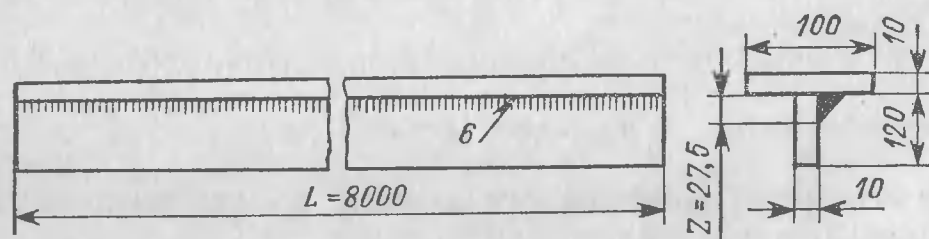


Рис. 76. Расчетная длина и сечение тавровой балки

2. Зная катет шва, находим площадь его сечения

$$F = \frac{k^2}{2} + 1,05kq = \frac{36}{2} + 1,05 \cdot 6 \cdot 1,5 = 27,7 \text{ мм}^2.$$

3. Энергия сварки определяется по формуле (25)

$$q_{\text{ш}} = 650F = 650 \cdot 27,5 = 17\,875 \text{ Дж/см}.$$

4. Определяем относительное продольное укорочение по оси балки по формуле (95)

$$\Delta_{\text{ц. т}} = 0,83 \cdot 10^{-6} \cdot 650 = 5,42 \cdot 10^{-4}.$$

5. Определяем кривизну балки, возникающую от наложения продольного шва по одной стороне, по всей длине полосы — по формуле (96)

$$C = 0,83 \cdot 10^{-6} \frac{17\,875 \cdot 2,75}{324,6} = 1,26 \cdot 10^{-4}.$$

6. Определяем стрелу прогиба балки по формуле (100)

$$f = 1,26 \cdot 10^{-4} \frac{640\,000}{8} = 10,1 \text{ см}.$$

7. Определяем общее укорочение балки по формуле (99)

$$\Delta L = 5,42 \cdot 10^{-4} \cdot 800 = 0,433 \text{ см}.$$

Наряду с тепловыми напряжениями при сварке могут возникнуть структурные напряжения, обусловленные пре-

вращениями и изменениями структуры в тех зонах основного металла, которые в процессе сварки нагреваются выше критических температур. В сталях особенно легко могут возникнуть структурные напряжения при образовании мартенсита, обладающего наибольшим удельным объемом.

При сварке или наплавке околошовная зона имеет участки, нагреваемые выше точек Ac_1 и Ac_3 начала и конца образования аустенита. Эти превращения, сопровождающиеся изменением объема, характерны для всех марок стали. Однако изменение объема у низкоуглеродистой стали всегда происходит при температурах выше 600°C , когда сталь находится в пластичном состоянии и предел упругости ее близок к нулю. Поэтому происходящие объемные изменения не сопровождаются образованием напряжений в металле. Зависимость объемных изменений в стали при нагреве и охлаждении от температуры показана на рис. 77.

Кривая 1 показывает, как будет меняться объем стали при нагревании, для всех марок стали она будет одинаковой. При этом до температуры Ac_1 и после Ac_3 изменение объема стали происходит пропорционально температуре нагрева. Но в интервале температур $Ac_1—Ac_3$ в связи с тем, что коэффициент теплового расширения для α -железа составляет $1,2 \cdot 10^{-5}$, а для γ -железа $2,0 \cdot 10^{-5}$, наблюдаем уменьшение объема при нагревании с температуры Ac_1 до температуры Ac_3 .

При охлаждении изменение объема идет по кривой 2 (рис. 77), и распад аустенита в малоуглеродистой стали происходит в интервале температур $Ac_3—Ac_1$, т. е. между $900—700^\circ\text{C}$, когда сталь весьма пластична; эти изменения объема происходят незаметно, без образования напряжений.

Иное положение создается при охлаждении легированных закаливающихся сталей, у которых из-за склонности

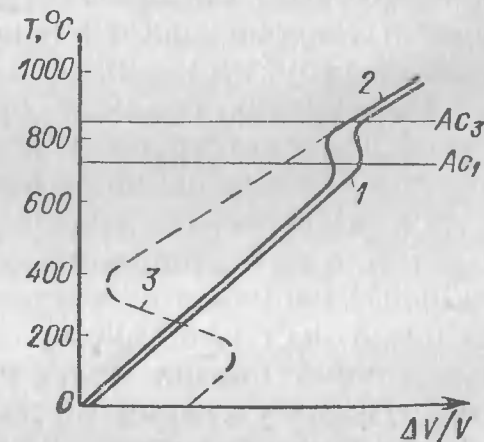


Рис. 77. Зависимость объемных изменений в стали при нагреве и охлаждении от температуры: 1 — кривая нагрева для всех сталей; 2 — кривая охлаждения для низкоуглеродистой стали; 3 — кривая охлаждения легированной стали

к переохлаждению распад аустенита происходит при более низких температурах.

Если закалка получается полная, то аустенит переохлаждается до сравнительно невысоких температур (200—350 °С) и затем сразу переходит в мартенсит. Образование мартенсита сопровождается еще более резким увеличением объема (кривая 3, рис. 77) ввиду того, что объемные изменения происходят при температурах 200—350 °С, когда металл находится в упругом состоянии, обладая высокой прочностью. Эти структурные превращения сопровождаются напряжениями, которые и называются структурными.

Расширению объемов образовавшейся структуры мартенсита препятствуют участки, не претерпевшие структурных превращений. Поэтому в объемах со структурой мартенсита возникают остаточные напряжения сжатия, а на пограничных слоях участков возникают продольные напряжения растяжения, вызывающие дополнительный рост пластических деформаций, которые в мало пластичных сталях могут привести к трещинам — отколам. Поэтому сварочные напряжения в закаливающих сталях более опасны; для сварки таких сталей требуется разработка более сложного технологического процесса.

§ 27. ДЕФОРМАЦИЯ И НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ СТЫКОВЫХ И ТАВРОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Деформации и напряжения при сварке стыковых соединений

Применение ранее рассмотренных условий образования напряжений и деформаций при наплавке валика на кромку полосы к случаю сварки двух полос встык позволяет установить общие закономерности возникновения напряжений и деформаций при сварке стыковых соединений. При выполнении стыковых соединений возникают как деформации в плоскости свариваемых листов, так и деформации из плоскости соединяемых элементов. Рассмотрим сначала деформации в плоскости свариваемых листов. Для этого полагаем, что на соединяемые встык кромки действует линейный источник теплоты, характеризуемый тем, что листы прогреваются по всей

толщине равномерно. Для упрощения считаем, что сварка соединения производится быстро движущим источником теплоты и поэтому с небольшой погрешностью можно принять, что шов по длине охлаждается равномерно. Принятые допущения позволяют нам полнее применить процессы, наблюдаемые при наплавке валика на кромку полосы, к случаям сварки стыковых соединений.

Значения и характер напряжений и деформаций в плоскости свариваемых встык листов будут прежде всего зависеть от соотношения ширины свариваемых листов.

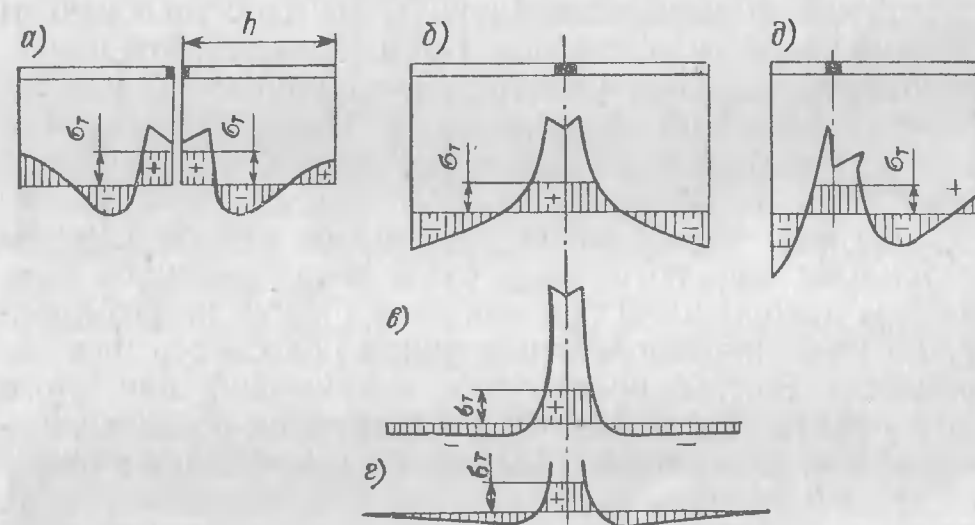


Рис. 78. Эпюры продольных напряжений

Если ширина одного листа равна h , а второго листа нулю, то напряжения и деформации в таком элементе будут такими же, как в случае наплавки валика на кромку.

Если совместить между собой две эпюры для случая наплавки валика на кромку полосы шириной h (рис. 78, а), то увидим, что полученная совмещенная эпюра продольных напряжений в какой-то мере отражает напряжения при сварке встык двух полос при вышепринятых допущениях. На внутренних кромках и в шве будут напряжения растяжения, равные пределу текучести, и пластические деформации растяжения, а также наблюдается укорочение кромок вследствие пластических деформаций сжатия при нагреве от сварки. Напряжения на наружных кромках будут зависеть от таких факторов, как погонная энергия и жесткость системы, в данном случае зависящая от ширины полос.

При сварке встык двух полос равной ширины эпюра продольных напряжений примет вид (рис. 78, б). При

этом на внутренних кромках и в шве будут напряжения растяжения, равные пределу текучести при более высоких пластических деформациях растяжения, чем в случае наплавки валика на кромку (вследствие большой жесткости системы).

При увеличении ширины полос, соединяемых встык, эпюра продольных напряжений изменится. Пластические деформации растяжения еще более возрастут, а сжимающие напряжения уменьшатся и будут распределены почти равномерно по ширине (рис. 78, в).

Дальнейшее увеличение ширины листов с увеличением при этом скорости перемещения источника теплоты приведет к относительному уменьшению ширины зоны пластических деформаций растяжения, а напряжения сжатия будут уменьшаться к наружным кромкам и на кромках могут быть равными нулю (рис. 78, г).

В случае сварки встык двух полос разной ширины деформации широкого листа будут в определенной мере подобны деформациям при наплавке валика на его кромку, но из-за противодействия узкой полосы ось шва искривится. Эпюры продольных напряжений для этого случая приведены на рис. 78, д. Чем больше разница в ширине свариваемых полос, тем больше напряжения в широкой полосе приближаются к эпюре при наплавке валика на кромку. Напряжения в узкой полосе сопровождаются пластическими деформациями растяжения на внутренней кромке и сжатия на наружной. Чем меньше разница в ширине свариваемых полос, тем больше эпюра приближается к случаю сварки встык двух полос равной ширины.

Деформация и напряжения при сварке тавровых сечений

При изготовлении сварных тавров, состоящих из двух листов, вследствие продольных и поперечных напряжений, а также укорочений возникают деформации стенки и пояса тавра.

Деформации сварного тавра, как и стыкового соединения, зависят от многих факторов:

- 1) от соотношения размеров стенки и пояса;
- 2) от последовательности наложения швов;
- 3) от погонной энергии и др.

Схема деформации сварного тавра показана на рис. 79, из которого видно, что деформация стенки тавра подобна

деформации полосы, на кромку которой наплавляется валик. Эти деформации по существу и определяют направление изгиба и общие деформации стенки и пояса, который, кроме того, получает деформацию из своей плоскости.

Для упрощения из всех возможных деформаций сварных тавров рассмотрим только продольные напряжения и деформации в вертикальной плоскости, пользуясь известной методикой определения продольных напряжений в стыковых соединениях.

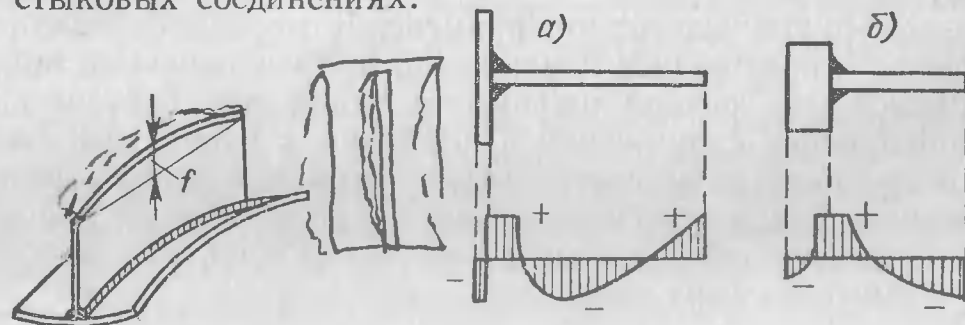


Рис. 79. Вид деформированного сварного тавра

Рис. 80. Эпюры продольных напряжений в тавровых сечениях

Продольные напряжения при сварке встык двух полос разной ширины зависят от соотношения ширины свариваемых листов, а продольные напряжения в сварных таврах — от соотношения размеров стенки и пояса тавра. Чем больше ширина вертикальной стенки и тоньше пояс, тем больше эпюра продольных напряжений сварного тавра приближается к эпюре, получающейся при наплавке валика на кромку полосы. Чем больше толщина пояса или меньше высота стенки тавра, тем больше эпюра продольных напряжений сварного тавра приближается к эпюре для случая сварки встык двух полос равной ширины (рис. 78, б).

Руководствуясь изложенным, построим эпюры продольных напряжений для двух сварных тавров; в одном случае для тавра с высокой стенкой и тонким поясом, в другом — для тавра с низкой стенкой и толстым поясом (рис. 80). В первом случае (рис. 80, а) прогиб вертикальной стенки такой, что наружная кромка имеет выпуклость и продольные напряжения растяжения. Наружная поверхность пояса имеет напряжения сжатия, а в зоне шва напряжения равны пределу текучести растяжения и имеются пластические деформации растяжения. Во втором случае (рис. 78, б) наружная кромка стенки получает вогнутость и продольные напряжения сжатия. При-

легающая к наружной поверхности часть сечения пояса также имеет напряжения сжатия, а в зоне шва, как и в первом случае, напряжения равны пределу текучести растяжения, и пластические деформации вследствие большой жесткости системы больше, чем в первом случае. Но вследствие относительно больших пластических деформаций сжатия при нагреве, при охлаждении длина балок после их сварки и охлаждения будет меньше начальной длины.

Следует указать, что применение методики для определения продольных напряжений при сварке встык полос равной или разной ширины, а также для определения продольных напряжений и деформаций в тавровых сечениях показало универсальность этой методики, в дальнейшем будем пользоваться ею для установления вероятных деформаций как отдельных элементов, так и более сложных конструкций.

Угловые деформации при сварке

В ранее рассмотренных случаях наплавки валиков на кромку, сварки стыковых соединений и тавровых сечений полагали, что деформации происходят только в плоскости свариваемого элемента. В действительности вследствие неравномерности сокращения слоев по сечению шва или зон соединения, нагретых при действии источника теплоты выше температуры пластических деформаций, наряду с деформациями в плоскости соединяемых деталей наблюдаются и деформации свариваемых листов из плоскости — так называемые угловые деформации.

Из рассмотренного известно, что границы проплавления основного металла при наплавке валика и выполнении шва определяются изотермической поверхностью, соответствующей температуре плавления данного металла, а участки пластических деформаций сжатия — температурой, определяемой по уравнению (94). Как видно из рис. 81, волокна верхней части сварного соединения, ограниченные изотермой (для стали Ст3 100 °C), значительно длиннее волокон, ограниченных этой же изотермой в нижней части соединения. Это приводит к большему укорочению верхних волокон, вследствие чего и появляются угловые деформации.

Угловые деформации при сварке соединений с угловыми швами возникают по тем же причинам, что и в стыковых соединениях.

Итак, чтобы угловые деформации были минимальными, необходимо, чтобы угол раскрытия был меньше, а разница в размерах верхних и нижних волокон зон разогрева была бы возможно меньше.

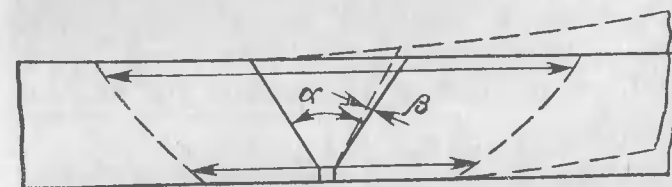


Рис. 81. Угловая деформация стыкового соединения с V-образным швом

Следует также иметь в виду, что на характер деформаций листов из плоскости и угловых деформаций влияет ряд технологических факторов: размер свариваемых листов, наличие закрепления, число проходов и др.

Деформации при сварке тавровых и двутавровых балок

Рассмотрим, как будут меняться деформации тавровой балки с изменением последовательности сварки.

При выполнении двух швов одновременно двумя сварщиками балка прогнется в сторону вертикальной стенки и наряду с деформацией из плоскости стенки будут также деформации в плоскости поясного листа. Но если шов выполнить от середины к концам с одной стороны вертикальной стенки тавра, то вследствие угловых деформаций появится прогиб стенки из плоскости. Выполнение затем шва с другой стороны вертикальной стенки и последующее охлаждение приведут к тому, что балка наряду с прогибом в сторону вертикальной стенки получит некоторый прогиб в плоскости пояса в сторону второго шва.

При сварке двутавровых балок могут возникнуть деформации из плоскости, деформации укорочения, а в ряде случаев местные деформации в виде выпучин. Общие и местные деформации зависят от погонной энергии сварки и последовательности наложения швов.

В случае сварки симметричной двутавровой балки (рис. 82) при выполнении первыми поясных швов 1—2, соединяющих вертикальную стенку с нижним поясом, деформации будут такие же, что и при сварке тавровых балок. Вертикальная стенка балки изогнется в плоскости,

нижний пояс получит вогнутость, а верхний — выпуклость, максимальный прогиб, допустим, определится отрезком 1. После кантовки выполнение швов 3—4, соединяющих стенку с верхним поясом, приведет к некоторому уменьшению стрелки прогиба f , полученной от первых двух швов, но полного устранения прогиба произойти не может, так как жесткость системы после наложения швов 1—2 станет больше, и поэтому останется прогиб такого же знака, что и полученный от швов 1—2 (отрезок 3). Следовательно, сваренный в указанной последова-

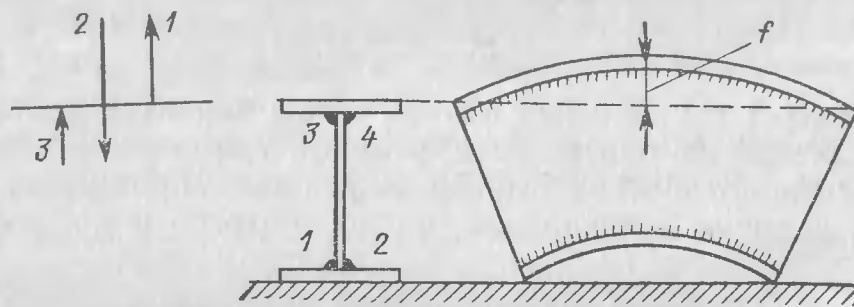


Рис. 82. Деформация сварной двутавровой балки

тельности двутавр будет иметь прогиб с вогнутостью того пояса, который приваривался первым. Меньшие деформации можно получить, если чередовать сварку отдельных участков швов то с одной, то с другой стороны стенки.

При автоматической сварке двутавровой балки для получения прямой балки можно рекомендовать следующее: швы 1—2 выполнять на большой скорости при меньшем, чем требуется по чертежу, сечении швов, затем выполнить швы 3—4 полным сечением и после вторичной кантовки перекрыть швы 1—2 до требуемого размера.

Избежать изгиба двутавровой балки в вертикальной плоскости можно, выполняя одновременно оба поясных шва с одной стороны стенки (например, швы 1—3) при горизонтальном положении балки, затем швы с другой стороны стенки (2—4).

После сварки швов 1—3 возникнет незначительная деформация балки в горизонтальной плоскости в направлении от швов 2—4 вправо, а после сварки швов 2—4 эта деформация несколько уменьшится. Остаточная деформация в горизонтальной плоскости будет небольшой, так как первые и вторые швы располагаются почти по оси балки.

Деформации и напряжения при сварке плоскостных листовых конструкций

При изготовлении резервуаров, элементов судового корпуса и ряда других конструкций часто возникает необходимость сборки и сварки весьма разнообразных по своим толщинам и габаритным размерам плоскостных листовых конструкций, которые будем условно называть полотнищами. Сборка, а главное сварка таких полотнищ, требует хорошо проработанного технологического

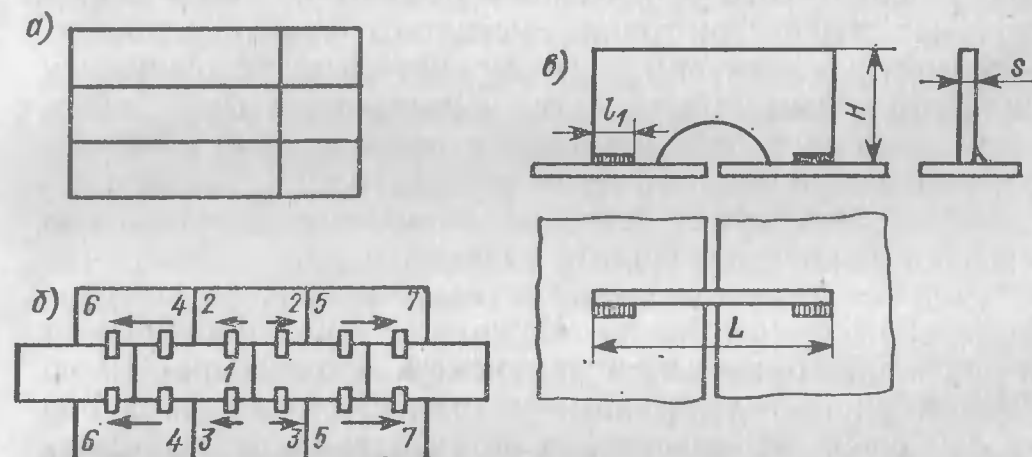


Рис. 83. Сборка полотнищ

процесса с определением последовательности выполнения сварки. Деформация сварных полотнищ происходит вследствие поперечных и продольных укорочений от сварки, при этом толщина соединяемых деталей заметно сказывается на характере деформаций.

Если при сварке толстолистового материала большая жесткость конструкции приводит к значительному развитию пластических деформаций, то при сварке тонких листов сжимающие напряжения при нагреве приводят к выпучиванию свариваемых листов из плоскости, а при охлаждении соединений из тонких листов происходит укорочение участков, расположенных вблизи шва и получивших при нагреве пластическую деформацию сжатия. Это, в свою очередь, приводит к возникновению напряжений сжатия на некотором расстоянии от шва и появлению там выпучин и тем самым к потере устойчивости.

Сборка и сварка полотнищ может производиться при совмещенных стыках (рис. 83, а) и разнесенных стыках (рис. 83, б). Элементы конструкций с совмещенными сты-

ками имеют ряд преимуществ по сравнению с несовмещенными.

При сварке совмещенного стыка он получает почти одинаковую пластическую деформацию от укорочения шва, в то время как при сварке несовмещенных стыков в сечении конструкции попадает сварной стык, претерпевающий при охлаждении пластическую деформацию, и целый свободный лист, не подвергающийся нагреву и поэтому не укорачивающийся. Это создает неравномерность поперечного укорочения в сечении по линии расположения стыка. При тонких листах это приводит к появлению местных выпучин в целом листе в месте окончания сварного стыка. Кроме того, совмещение стыков полотнищ имеет ряд технологических преимуществ, а именно: создается возможность более широкого применения автоматической сварки, секционно-блочного изготовления крупногабаритных сварных изделий и др.

Для предотвращения вероятности появления выпучин при сварке полотнищ из тонкого материала прибегают к различным приемам, в том числе к закреплению свариваемых листов. Уложенные на плиту листы собираются между собой на эластичных прихватках или гребенках (рис. 83, в). Расстояние между гребенками принимается такое же, как и между обычными прихватками (в пределах 200—400 мм в зависимости от толщины свариваемых листов).

В тех случаях, когда по каким-либо причинам возникает необходимость сборки и сварки плоскостной конструкции с несовмещенными стыками, продольные стыки следует собирать на гребенках, что обеспечит свободное укорочение листов при сварке поперечных стыков. Поперечные стыки при сборке можно закреплять как гребенками, так и на обычных прихватках. Сварку следует производить в последовательности, указанной на рис. 83, б. Такая последовательность сварки обеспечивает свободное укорочение металла сварного соединения, в результате чего деформации полотнища или подобных конструкций будут небольшими.

§ 28. Меры борьбы со сварочными деформациями и напряжениями

Весь комплекс мероприятий по борьбе с деформациями и напряжениями от сварки можно расчленить на две основные группы:

1) мероприятия, предотвращающие вероятность возникновения деформаций и напряжений или уменьшающие их влияние;

2) мероприятия, обеспечивающие последующее исправление деформаций и снятие возникших напряжений.

К первой группе мероприятий можно отнести выбор правильной последовательности сварки изделия, закрепление, предварительный обратный выгиб, подогрев, интенсивное охлаждение свариваемых деталей и некоторые другие.

Влияние методов сварки и направления выполнения швов на остаточные деформации

Практикой и исследованиями установлено, что на остаточные деформации и напряжения при сварке наряду с неравномерностью распределения температуры в свариваемом металле существенное влияние оказывает неодновременность наложения шва по длине и сечению шва, последовательность и направление выполнения швов.

При сварке широко применяются такие методы выполнения швов по длине: напроход от середины к концам, вразброс; а по сечению — однопроходный, многопроходный, каскадный, блочный, горкой и др.

Влияние методов и последовательности сварки на возможные деформации раньше нами рассматривалось на конкретных примерах сварки различных конструкций, но наряду с выбором методов и последовательности сварки необходимо также уделить внимание выбору направления наложения отдельных швов, так как направление сварки отдельных швов заметно влияет на деформацию изделия.

Влияние жесткого закрепления и предварительного выгиба на остаточные деформации

Жесткое закрепление обеспечивается прикреплением балок перед сваркой к плите, стеллажам (рис. 84, а) или временным соединением свариваемых балок свободными кромками на прихватках (рис. 84, б).

Вследствие жесткого закрепления увеличивается пластическая деформация в зоне шва, а это может значительно

снизить остаточный прогиб и довести его до таких размеров, что последующее исправление балок не потребуется.

При обеспечении закрепления попарным скреплением тавровых балок прихватками сварка их может производиться по одному из ранее рассмотренных приемов сварки двутавровых балок.

Предварительный выгиб свариваемых деталей может быть применен как для борьбы с деформациями из плоскости, так и с деформациями в плоскости.

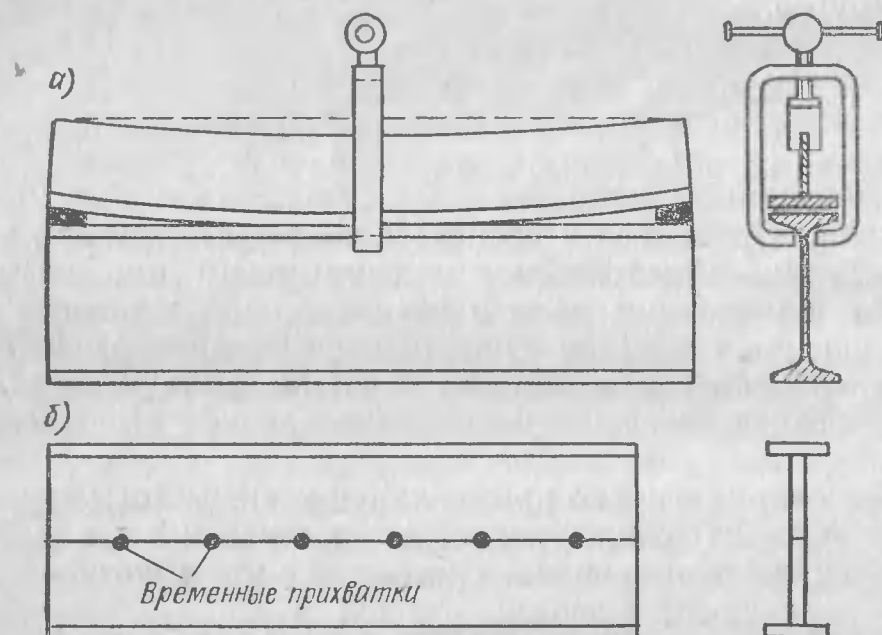


Рис. 84. Закрепление тавровых балок для предупреждения остаточных деформаций: а — предварительный упругий выгиб; б — жесткое закрепление при помощи прихваток

Обратный выгиб свариваемых кромок широко применяется для борьбы с угловыми деформациями стыковых соединений. Так, в случае сварки двух листов небольшой ширины с V-образной подготовкой кромок, для предотвращения угловых деформаций свариваемые листы перед сваркой располагают под некоторым углом относительно друг друга. При этом угол предварительного выгиба берется равным углу β , т. е. ожидаемой угловой деформации (рис. 85), но с противоположным знаком. Предварительный выгиб определяется опытным путем или расчетом. После сварки, когда произойдут угловые деформации, равные углу β , листы окажутся в одной плоскости.

При сварке встык с V-образным швом листов большой ширины, когда уложить их, как показано на рис. 85, а,

не представляется возможным, листы можно уложить на плиту, осуществив предварительный выгиб свариваемой кромки посредством подкладок под стык (рис. 85, б).

Для предотвращения деформаций из плоскости поясов тавровых или двутавровых сечений применяют приспособления, при помощи которых производится упругая или пластическая деформация пояса. При упругом выгибе пояса приспособления устанавливаются на расстоянии 500—600 мм друг от друга и после осуществления выгиба остаются на изделии во время сварки до полного охлаждения шва (рис. 86, а).

При пластической деформации пояса приспособление используется только для осуще-

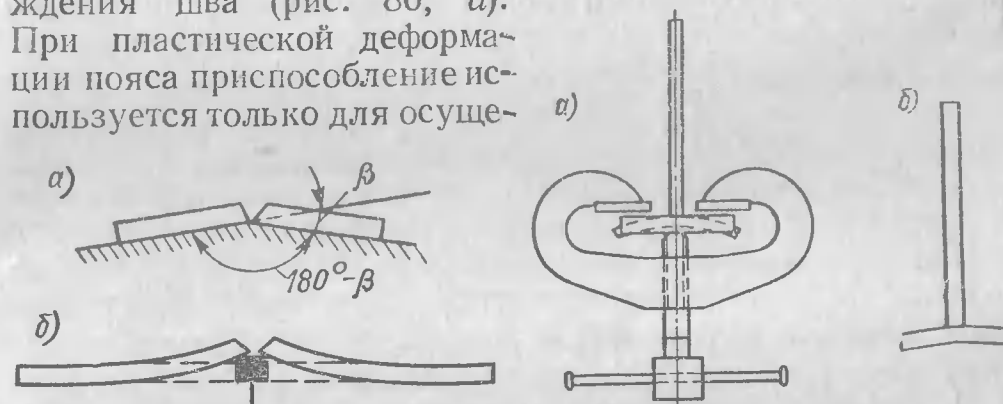


Рис. 85. Обратный выгиб свободных и закрепленных листов небольшой ширины (а); большой ширины (б)

Рис. 86. Предупреждение деформаций из плоскости поясов балок: а — упругий выгиб; б — пластический выгиб

ствления выгиба (рис. 86, б), после чего оно снимается и производится сварка балки.

Наряду с упругим выгибом тавровых балок (см. рис. 86, а) применяется пластический обратный выгиб, заключающийся в том, что вертикальной стенке при заготовке в плоскости стенки по всей ее длине придают выгиб в сторону, обратную ожидаемым деформациям. Затем вертикальная стенка прихватывается к поясу и производится сварка. Предварительный выгиб определяется опытным путем или расчетом.

Влияние искусственного интенсивного охлаждения, подогрева и пластической деформации растяжения на остаточные деформации

Интенсивное охлаждение сварных соединений приводит к сужению участка действия температур, вызывающих пластические деформации при сварке, и тем

самым к понижению остаточных деформаций и напряжений. Это положение иллюстрируется кривыми распределения температур по оси y . Характер распределения температур при искусственном охлаждении стыкового шва водой во время сварки показан на рис. 87 (кривая 1). По кривой видно, что при интенсивном охлаждении участок пластической деформации соединения значительно уменьшается по сравнению с участком пластических деформаций соединения, выполненного без охлаждения (кривая 2). Искусственное охлаждение для уменьшения остаточных деформаций может быть применено только

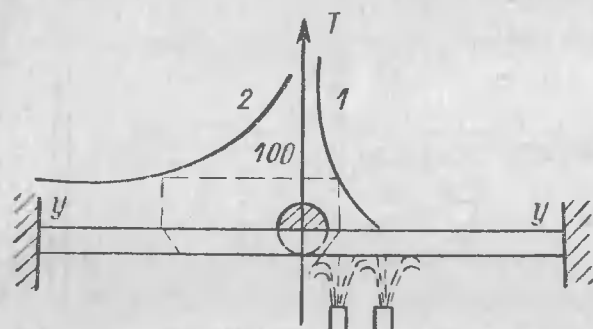


Рис. 87. Распределение температуры и размеры участков пластических деформаций при искусственном охлаждении и без охлаждения

при сварке низкоуглеродистых незакаливающихся сталей. При сварке закаливающихся сталей применение искусственного охлаждения для уменьшения остаточных деформаций недопустимо.

Подогрев (общий, а иногда местный) применяют для предотвращения напряжений и последующих деформаций при сварке. Подогрев снижает неравномерность распределения температур и тем самым может уменьшить или совершенно устранить действие основного фактора, вызывающего сварочные напряжения и деформации.

При сварке изделий из высокопластичных материалов, как, например, низкоуглеродистой или низколегированной стали, в обычных условиях применять подогрев для уменьшения местных пластических деформаций в зоне шва нет никакой необходимости. Но для сварки таких изделий при низких температурах, когда повышается хрупкость металла и увеличивается перепад температур, иногда применяют местный подогрев. При этом местному подогреву следует подвергать несвариваемые кромки деталей, что не дает никакого положительного эффекта и может привести к повышению местных пластических деформаций на участке деталей, где возникают напряжения растяжения

при нагреве от сварки и напряжения сжатия после охлаждения изделия.

При сварке пластичных материалов в условиях низких температур или повышенной жесткости вместо местного подогрева можно рекомендовать проведение сварки с большой погонной энергией и сопутствующей тепловой изоляцией района шва в процессе сварки.

Пластической деформацией сварных швов и околошовной зоны можно достичь уменьшения и даже полного снятия сварочных напряжений, а также остаточных деформаций. Это может быть достигнуто путем местной обработки швов и околошовной зоны, при которой в них создаются дополнительные пластические деформации растяжения, устраняющие деформации сжатия, возникающие при сварке. Такая обработка швов достигается проколачиванием или проковкой. Проколачивание шва в горячем состоянии следует производить при температурах металла не ниже 500°C , чтобы не попасть в интервал температур пониженной его пластичности. Проколачивание в горячем состоянии обычно производится при горячей сварке; прибегать к специальному нагреву для осуществления этой операции и в других случаях нет необходимости, так как исследованиями установлено, что проколачивание швов при температурах от 100°C и ниже является весьма эффективным методом снятия напряжений. Холодное проколачивание шва и околошовной зоны производят от температуры, не превышающей 100°C , до обычной. Удары при этом производятся вручную, молотком массой $0,6\text{—}1,2\text{ кг}$ с закругленным бойком или пневматическим молотком с плоской чеканкой при слабом нажиме.

Проколачивание металла однопроходного шва после его полного охлаждения должно производиться при плотном его прилегании к плите или стеллажам. Проколачивание при многослойной сварке должно проводиться по каждому слою, за исключением первого, так как при сварке первого слоя на весу (обычно малого сечения) в корне шва могут образоваться несплошности по форме надреза, которые в период проколачивания могут распространиться в виде трещин в металл шва.

Из сказанного следует, что этот прием можно рекомендовать для снятия напряжений при заварке трещин, замыкающих швов в жестких конструкциях и полотнищ из относительно тонких листов.

Способы полного снятия напряжений

Наиболее эффективным способом полного снятия напряжений является термическая обработка, которой довольно часто подвергают сварные изделия из легированных сталей.

Для снятия напряжений назначается высокий отпуск. При такой термической обработке сварочные напряжения снимаются за счет того, что при нагреве предел текучести материала сильно падает и при температуре 600 °С близок к нулю; поэтому материал не оказывает сопротивления пластическим деформациям, благодаря чему внутренние остаточные напряжения полностью исчезают.

Проведенные исследования показали, что применение термической обработки сварных изделий может быть рекомендовано, когда необходимо исключить искажение формы сварных конструкций после механической обработки и в процессе эксплуатации вследствие перераспределения напряжений и пластических деформаций.

Практика показала, что со сварных конструкций (к которым предъявляются высокие требования по точности обработанных поверхностей, если они не подвергались термической обработке перед механической обработкой) в процессе механической обработки могут быть удалены участки, имеющие напряжения одного знака, вследствие чего произойдет перераспределение напряжений, и точность механически обработанных поверхностей будет нарушена. Это может также произойти в процессе эксплуатации этого изделия.

Целесообразность назначения термической обработки для сварных конструкций в каждом конкретном случае определяется в зависимости от применяемых материалов, технологии изготовления конструкций и условий ее эксплуатации.

Способы исправления деформированных деталей

Когда деформации сварных изделий выходят за пределы допустимых, возникает необходимость их исправления правкой. Сварочные деформации можно устранить механической или термической правкой.

Механическая правка заключается в растяжении сжатых участков деформированной детали. Разберем процесс

механической правки листа, имеющего деформацию в плоскости (серповидный прогиб, рис. 88, а). В этой детали сжатой окажется кромка с вогнутостью, поэтому при ручной ее правке деталь размещается на плите, и ударами через гладилку осуществляется пластическая деформация растяжения сжатой части детали до тех пор, пока деталь не примет требуемую форму. При механической правке такой детали на вальцах между верхними валками и сжатой частью детали располагают полосу, через которую передается усилие для растяжения сжатой части.

При необходимости правки листа с деформацией из плоскости (выпучина в середине листа), начиная от краев

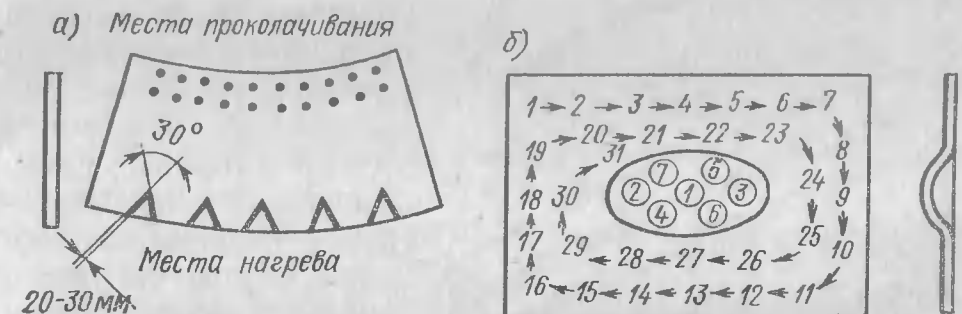


Рис. 88. Механическая и термическая правка деталей

и перемещаясь к месту расположения выпучины, будем постепенно растягивать сжатые волокна. Применение последовательности правки, указанной на рис. 88, б, обеспечивает постепенное растяжение средней сжатой части листа и устранение выпучины.

Термическая правка (правка нагревом) достигается за счет пластических деформаций сжатия растянутых участков. Нагрев можно осуществить газовой горелкой, электрической дугой.

Допустим, нам требуется выправить две ранее указанные детали.

Для устранения деформаций первой детали достаточно произвести местный нагрев нескольких участков от середины растянутой зоны выше температуры пластических деформаций. В связи с тем, что нагреваемые участки не могут свободно удлиняться, в них произойдет пластическая деформация сжатия и укорочение длины нагреваемого участка, за счет чего по завершении термического цикла нагретая кромка укоротится, и деформации

в плоскости будут ликвидированы. Из указанных способов подогрева предпочтительнее нагрев горелкой, пользуясь которой легче обеспечить нужную температуру (в пределах 700—800 °С) и форму нагрева.

При термической правке детали, показанной на рис. 88, б, имеющей выпучину, нагрев производится в виде окружностей диаметром 30—60 мм, желательно со стороны выпучины. Нагрев производится в шахматном порядке (рис. 88, б). При правке тонколистовых деталей сразу же после нагрева окружность проколачивается деревянным молотком при наличии с другой стороны листа поддержки, чем достигается большое укорочение в зоне нагрева.

После охлаждения размер нагретой окружности по диаметру уменьшается, в ней возникают напряжения растяжения, которые совместно с укорочением и приводят к ликвидации выпучины.

На рис. 89 показаны места 1, форма и примерное расстояние между участками нагрева

для трех типовых случаев деформаций балок таврового сечения. В случае деформации из плоскости в сторону вертикальной стенки, что характерно для балок таврового сечения с развитой вертикальной стенкой, при правке нагревается верхняя часть вертикальной стенки (рис. 89, а). При деформации в сторону пояса для правки производится нагрев определенных участков самого пояса (рис. 89, б). При сложной деформации из плоскости балок с несимметричным расположением элементов требуется нагрев как вертикальной стенки, так и пояса (рис. 89, в).

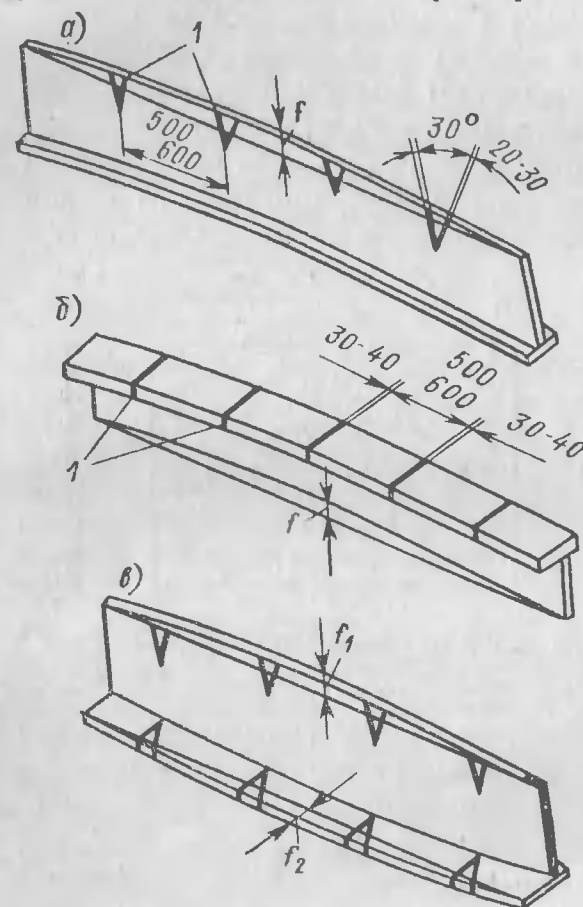


Рис. 89. Вид деформаций и мест нагрева при правке балок таврового сечения

ГЛАВА VI. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

§ 29. СВАРНЫЕ ШВЫ И СОЕДИНЕНИЯ

Основные типы и конструктивные элементы сварных швов для ручной электродуговой сварки углеродистых и низкоуглеродистых сталей установлены ГОСТ 5264—80, а для автоматической и полуавтоматической сварки под флюсом — ГОСТ 8713—70.

Все сварные швы делятся на ряд типов в зависимости от вида соединения, в котором они применены. По этому признаку основные типы сварных швов делятся на следующие четыре группы: швы стыковых соединений, швы угловых соединений, швы тавровых соединений (впристык) и швы нахлесточных соединений. Стыковые швы являются наиболее распространенными. Форма подготовки кромок для различных типов швов приведена в табл. 23.

При нормальных режимах ручной нижней сварки можно обеспечить провар до 3—4 мм, при автоматической сварке на повышенных режимах можно проварить толщину значительно больше — 10—12 мм, но в этом случае может получиться неблагоприятная форма сечения шва. Чтобы избежать непровара при ручной сварке и добиться нормального формирования шва при автоматической сварке, прибегают к скосу кромок.

При назначении форм подготовки кромок стыковых соединений, наряду с необходимостью обеспечения провара следует также учитывать технологические и экономические условия процесса. Так, стыковые соединения с V-образной подготовкой (со скосом одной или двух кромок) ГОСТом рекомендуется применять на металле толщиной 3—26 мм. При большей толщине резко возрастает масса наплавленного металла, уменьшение которого может быть достигнуто в том случае, если применить криволинейный скос одной или двух кромок и кантовать деталь. При возможности кантовки стыкового соединения или удобном доступе с двух сторон на металле толщиной от 12 до 40 мм выполняется К-образная, а при толщине от 12 до 60 мм Х-образная подготовка кромок. В последнем случае количество наплавленного металла по сравне-

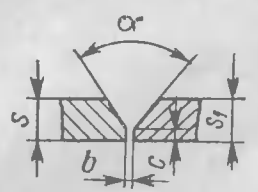
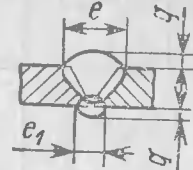
Таблица 23. Швы сварных соединений

Вид соединения	Форма подготовки кромок	Характер выполненного шва	Форма поперечного сечения		Толщина свариваемого материала, мм	Способ сварки
			подготовленных кромок	выполненного шва		
Стыковое	С отбортовкой	Односторонние			1—4 1,5—3 1—3	Р А Г
	Без скоса кромок				1—6 2—12 1—6	Р А Г
		Двусторонние			3—8 20—60 3—10	Р А Г
	С V-образным скосом кромок	Односторонние			3—60 8—24 8—30	Р А Г
	С X-образным скосом кромок	Двусторонние			8—120 20—60 12—120	Р А Г
	С К-образным скосом				8—100 20—30 12—100	Р А Г

Угловое	С криволинейным скосом кромок				15—100 30—100	Р А
	Без скоса кромок	Двусторонний			2—30 6—14 2—30	Р А
	Со скосом одной кромки	Двусторонний			3—60 8—20 8—30	Р А Г
Тавровое	Без скоса кромок	Двусторонний			2—40 3—40 2—40	Р А Г
	С двумя скосами одной кромки				8—100 16—40 12—100	Р А Г
Нахлесточное	Без скоса кромок				2—60 1—20	Р А

Примечание. Р — ручная сварка; А — автоматическая сварка; Г — сварка в среде CO₂.

Таблица 24. Швы стыковых соединений, V-образные со скосом

																			
Подготовка кромок	Выполненный шов																		
Ручная сварка	Автоматическая сварка под флюсом																		
<table><tr><td>s</td><td>c = b</td><td rowspan="2">$\alpha, \dots^\circ$</td></tr><tr><td colspan="2">мм</td></tr></table>	s	c = b	$\alpha, \dots^\circ$	мм		<table><tr><td>s</td><td>e</td><td>q</td><td rowspan="2">$\alpha, \dots^\circ$</td><td>b</td><td>c</td><td>e₁</td></tr><tr><td colspan="3">мм</td><td colspan="3">мм</td></tr></table>	s	e	q	$\alpha, \dots^\circ$	b	c	e ₁	мм			мм		
s	c = b	$\alpha, \dots^\circ$																	
мм																			
s	e	q	$\alpha, \dots^\circ$	b	c	e ₁													
мм				мм															
3—8	1±1,0	55±3	14—16	20±4	2 ^{+1,0} _{-1,5}	60±5	2±2	2±1	9±2										
9—14	2 ⁺¹ ₋₂		18—20	25±5	2,5 ⁺² _{-2,0}														
15—21			22—24	30±6															
22—26			26—30	37±7															

нию с наплавленным металлом при V-образной подготовке кромок уменьшается почти в 2 раза, уменьшаются также сварочные напряжения и деформации (рис. 90).

При сварке металла толщиной от 30 до 60 мм рекомендуется X-образная подготовка с криволинейными скосами двух кромок.

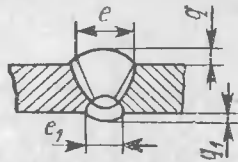
В табл. 23 приведены некоторые наиболее широко применяющиеся типы швов сварных соединений, а в табл. 24 конструктивные элементы швов стыковых соединений с V-образной подготовкой кромок, рекомендуемых для ручной, автоматической, полуавтоматической сварки под флюсом и в среде CO₂. В табл. 25—26 показаны конструктивные элементы швов угловых и тавровых соединений для тех же способов сварки.

Кроме того, швы различают по ряду других признаков.

1. По форме наружной поверхности стыковые швы могут быть: плоские (нормальные) и выпуклые (усиленные), а угловые швы могут быть еще и вогнутыми (ослабленные).

2. По положению швов в пространстве в момент их выполнения различают следующие швы: нижние — выполняемые горизонтально на горизонтальной поверхности;

двух кромок, двусторонние

							
Выполненный шов							
Сварка в среде CO ₂							
s	e	q	$\alpha, \dots^\circ$	b	c	e ₁	q ₁
мм				мм			
4—16	13±2	2 ⁺¹ _{-2,0}	40±5	1±1	2 ⁺¹ ₋₂	8±2	2±1
18—20	19±3						
22—24	20±3						
26—30	25±3						

вертикальные — выполняемые вертикально на вертикальной поверхности снизу вверх или сверху вниз; горизонтальные — выполняемые по горизонтали на вертикальной поверхности; потолочные — выполняемые при расположении сварщика под изделием, и сварке как бы по потолку.

Промежуточные положения относят к одному из вышеуказанных в соответствии со схемой, приведенной на рис. 91.

3. По протяженности швы бывают сплошные и прерывистые. Прерывистые швы применяются в тех случаях, когда в соединениях не требуется герметичность, и сплошные швы минимального размера являются слабонагруженными.

Для предварительного закрепления деталей при сборке конструкций применяют еще прихватки. По длине они могут быть от нескольких миллиметров до 3—4 см в зависимости от толщины закрепляемых деталей: чем толще детали, тем длиннее должны быть прихватки.

4. По методу заполнения сечения шва различают однослойный и многослойный (многопроходный) швы.

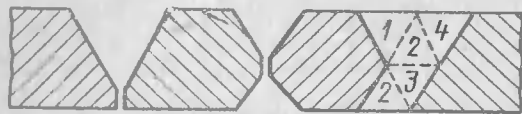


Рис. 90. Соотношение площадей сечения наплавленного металла с V-образной и X-образной разделкой кромок

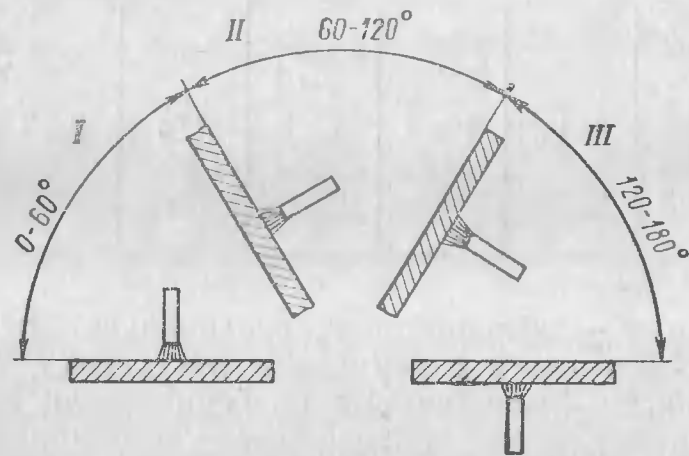


Рис. 91. Схема пространственного расположения швов:

I — нижнее; II — вертикальное; III — потолочное

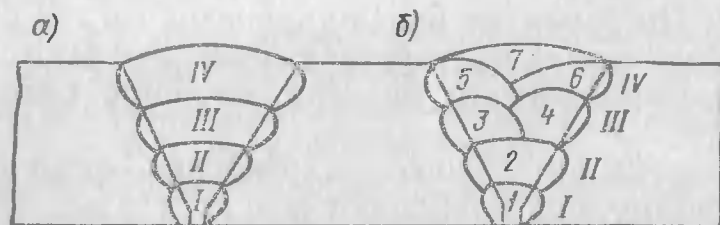
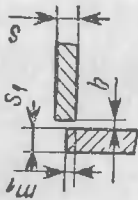
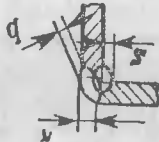
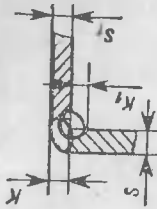


Рис. 92. Способы заполнения разделки по сечению: а — четырьмя слоями; б — в средней и верхней частях два каждый слой в несколько проходов

Таблица 25. Швы угловых соединений без скоса кромок, двусторонние

Подготовка кромок	Выполненный шов	Выполненный шов
		
Подготовка кромок	Выполненный шов	Выполненный шов

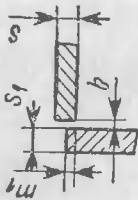
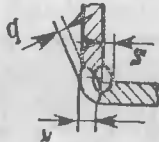
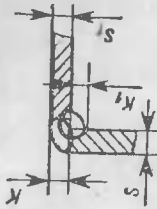
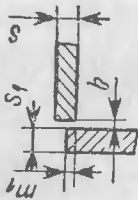
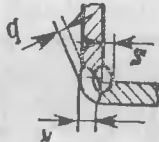
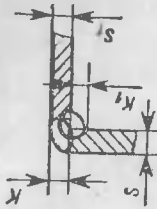
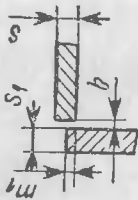
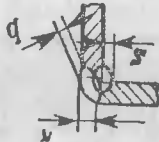
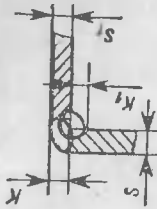
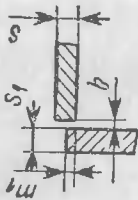
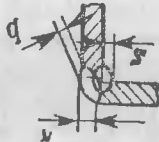
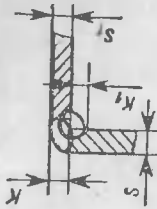
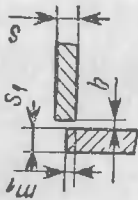
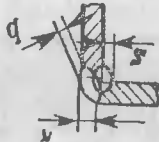
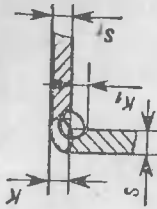
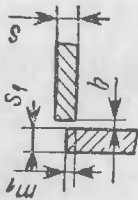
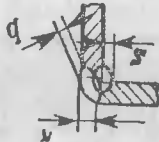
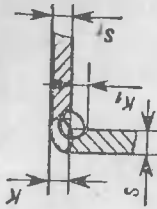
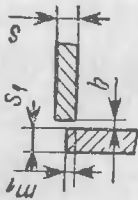
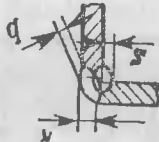
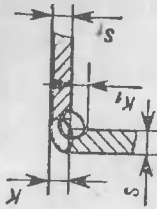
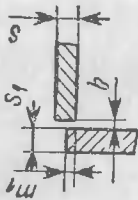
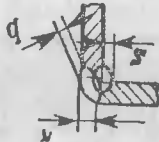
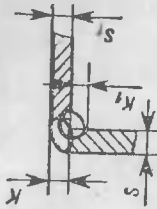
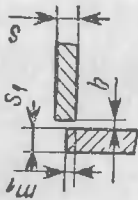
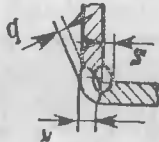
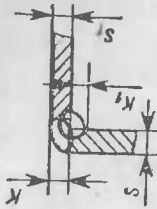
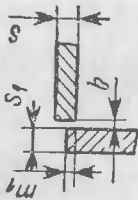
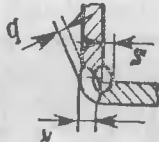
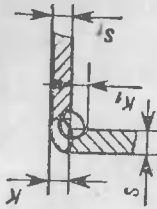
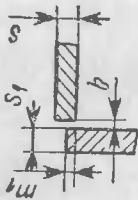
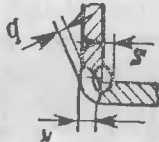
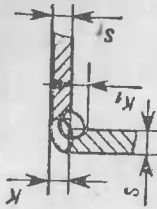
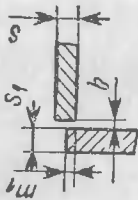
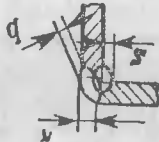
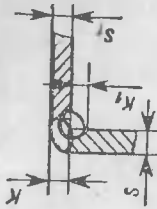
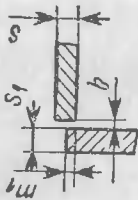
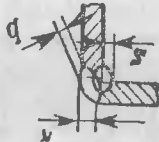
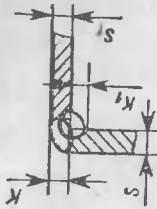
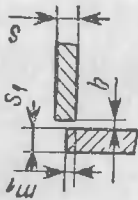
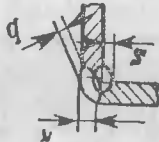
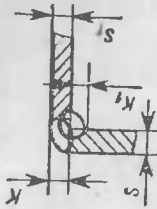
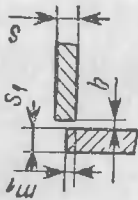
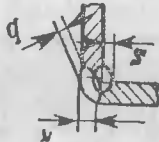
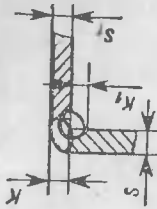
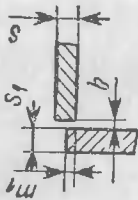
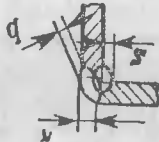
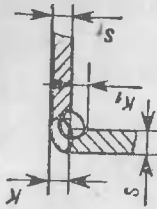
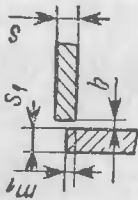
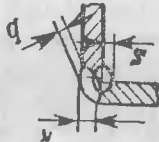
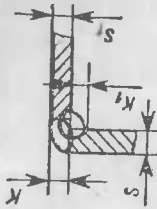
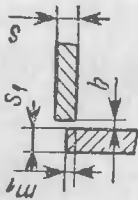
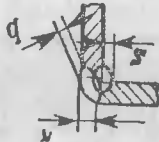
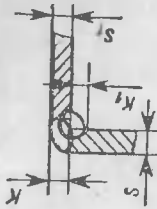
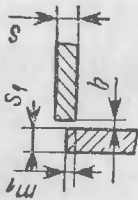
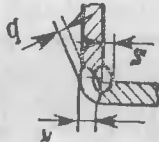
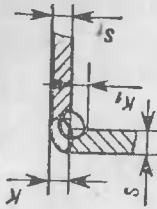
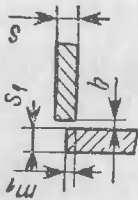
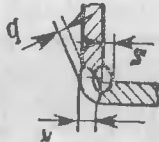
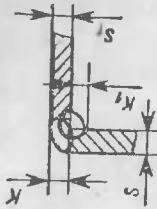
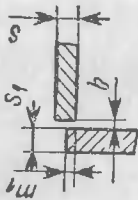
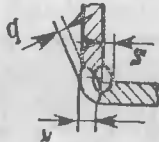
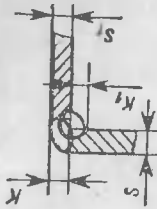
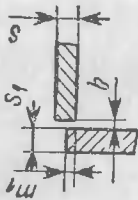
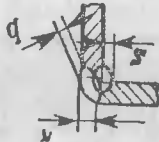
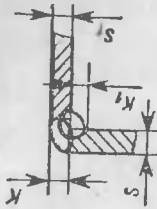
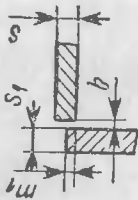
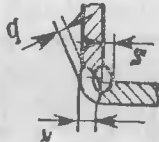
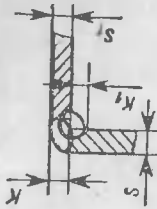
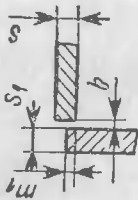
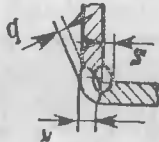
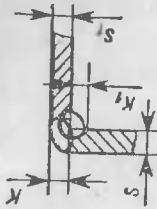
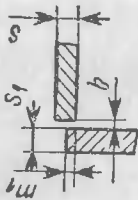
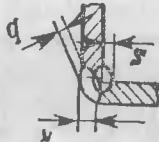
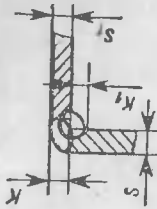
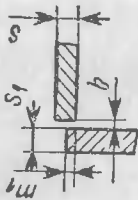
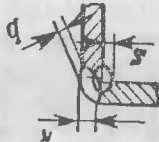
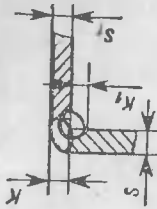
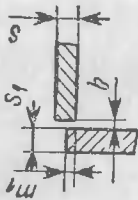
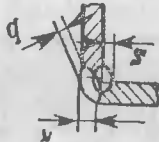
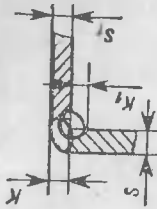
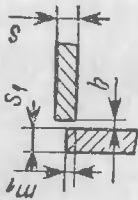
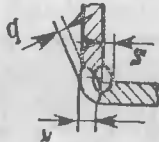
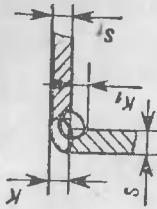
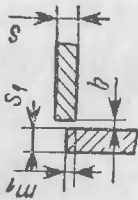
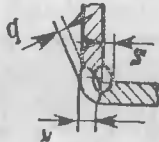
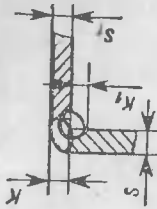
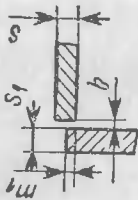
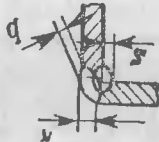
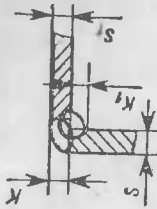
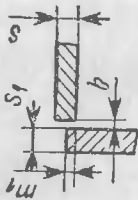
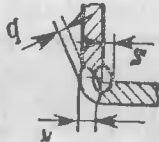
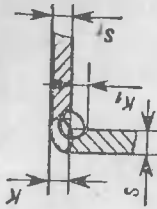
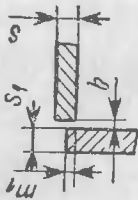
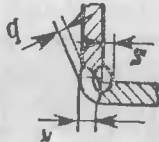
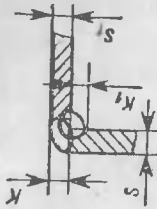
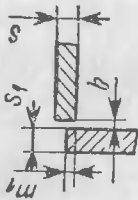
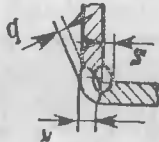
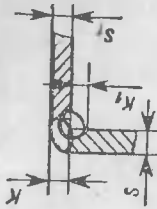
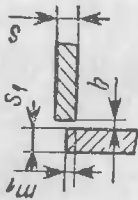
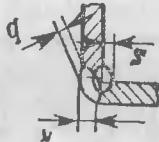
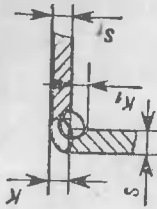
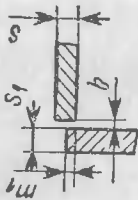
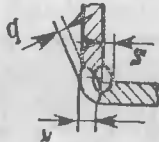
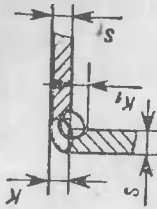
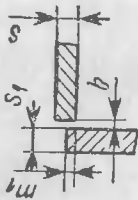
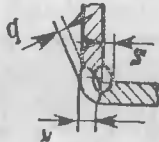
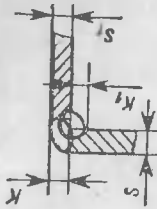
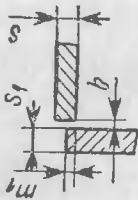
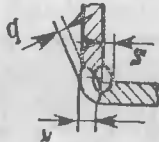
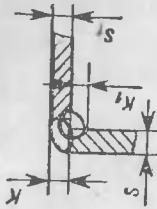
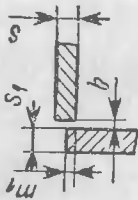
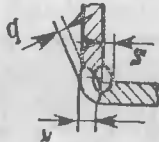
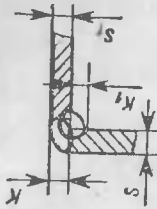
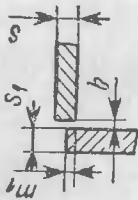
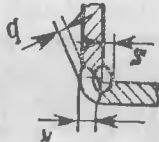
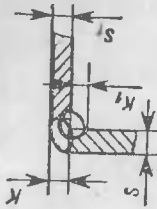
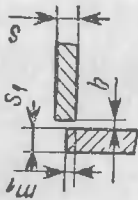
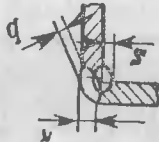
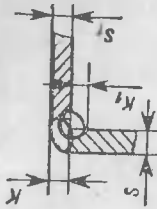
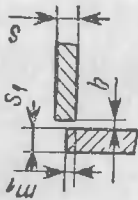
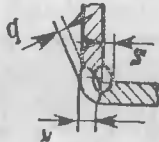
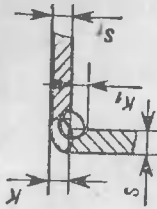
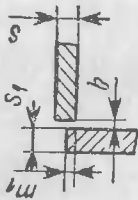
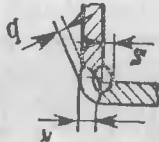
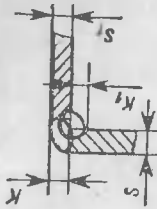
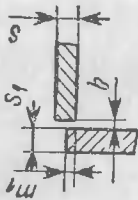
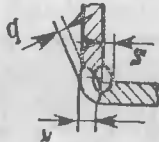
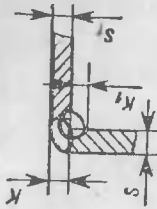
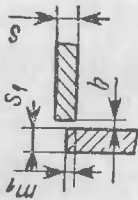
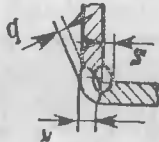
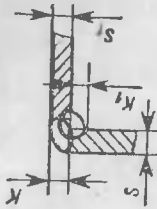
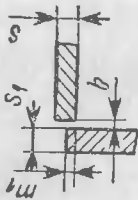
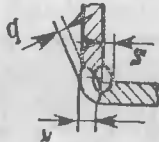
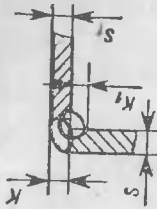
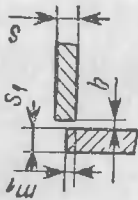
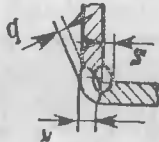
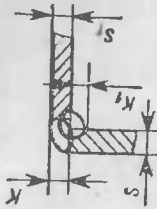
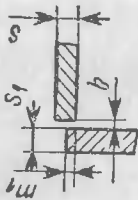
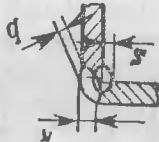
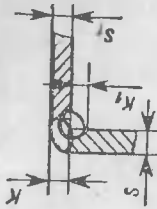
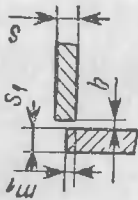
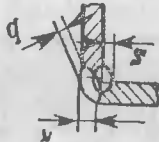
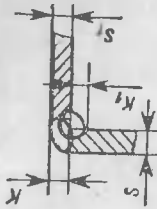
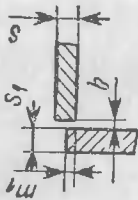
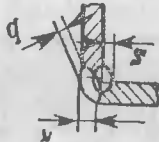
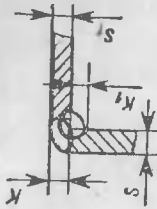
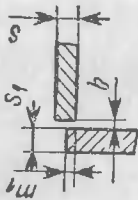
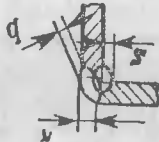
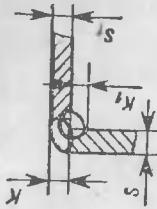
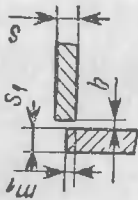
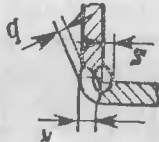
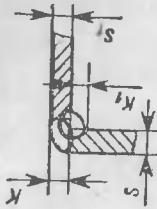
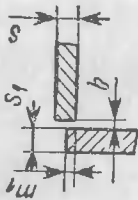
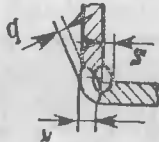
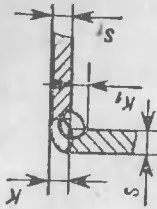
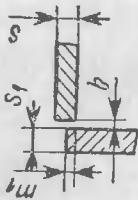
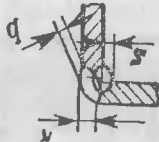
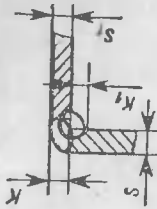
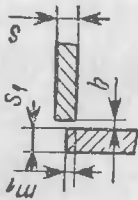
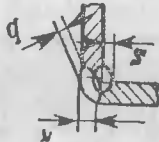
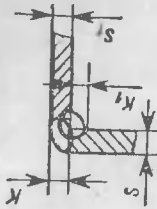
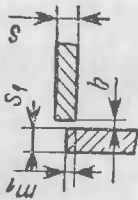
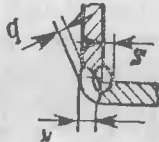
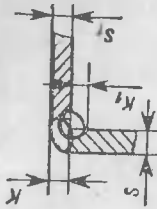
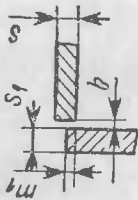
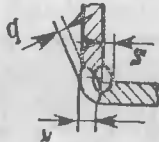
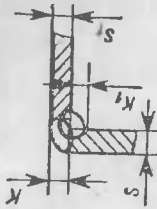
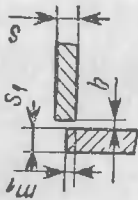
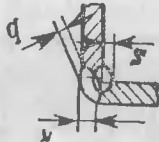
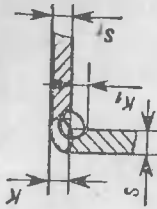
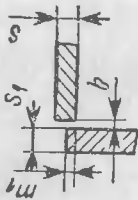
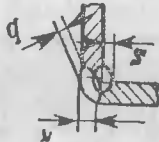
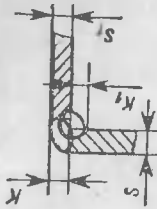
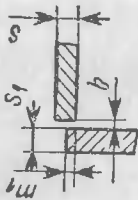
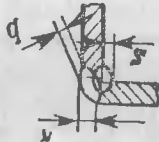
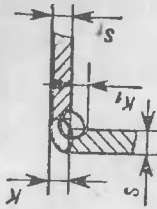
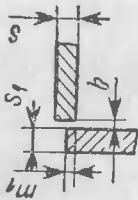
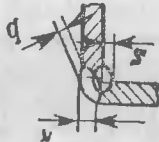
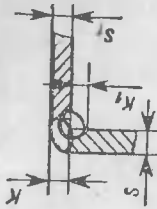
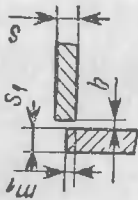
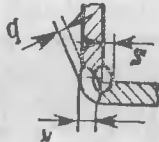
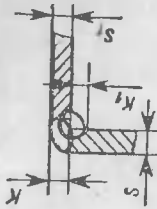
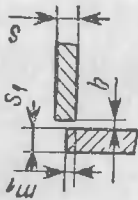
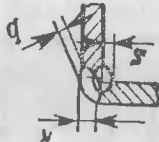
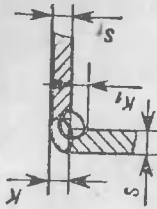
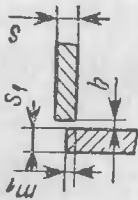
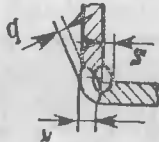
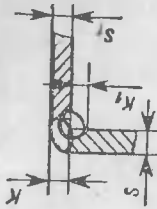
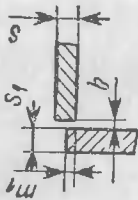
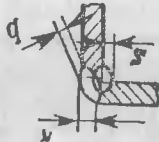
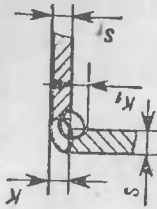
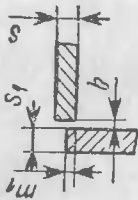
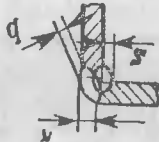
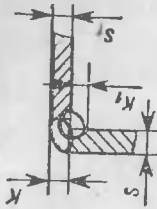
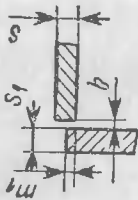
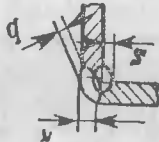
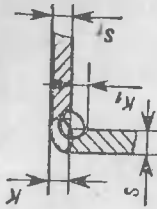
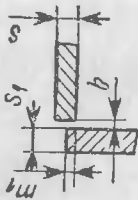
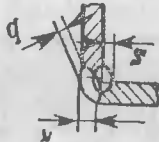
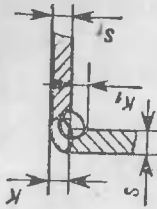
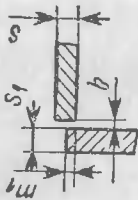
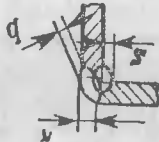
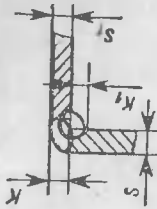
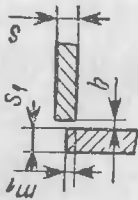
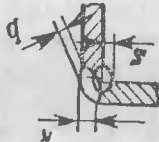
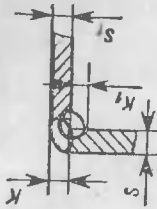
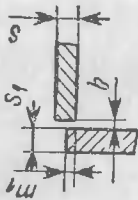
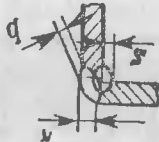
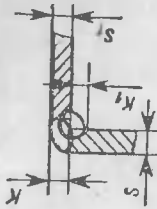
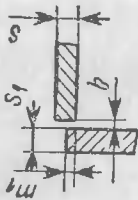
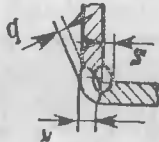
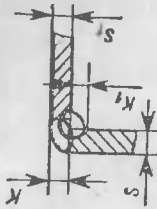
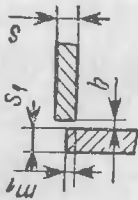
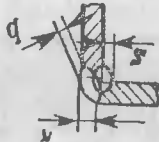
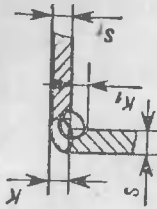
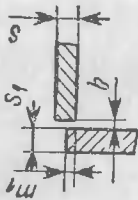
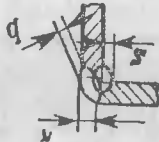
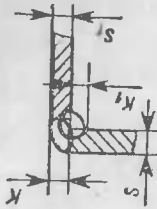
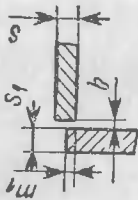
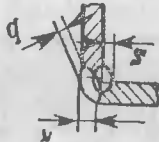
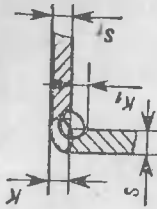
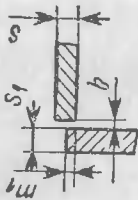
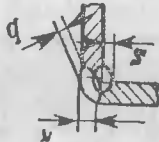
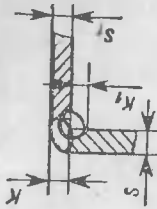
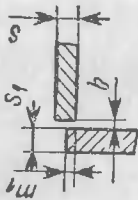
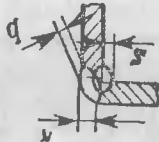
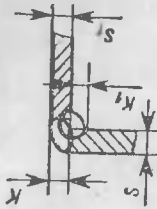
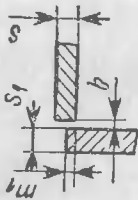
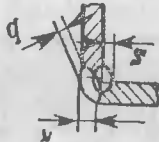
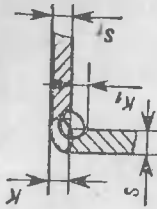
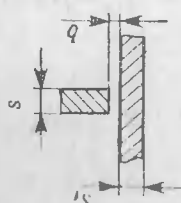
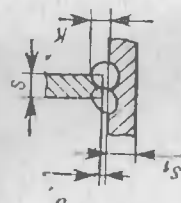
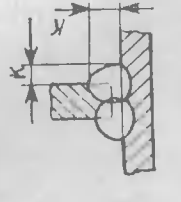
Ручная сварка	Автоматическая сварка под флюсом					Сварка в среде CO ₂					
											
											
											
											
											
											
											
											
											
											
											
											
											
											
											
											
											
											
											
											

Таблица 26. Швы тавровых соединений без скоса кромок, двусторонние

 Подготовка кромок	 Выполненный шов			 Выполненный шов					
Ручная сварка			Автоматическая сварка под флюсом			Сварка в среде CO ₂			
s	κ не менее	s ₁	b	s	κ не менее	b	s	κ не менее	b
мм									
2—4,5	3	0,7s	0+2	3—5	3	0+1	18	6	0+1,5
5—6	4			6—10	4	0+1,5	24	8	0+2,0
7—9	5			12—16	5		30	8	
10—30	6—8	0+3		18—40	0,35s		34	10	
							36	10	
							40	10	

Примечание. Размеры к относятся к нерасчетным швам.

Примечание. Размеры κ относятся к нерасчетным швам.

Проход — часть сечения шва, выполняемого за однократное перемещение электрода вдоль шва. **Слой** — часть сечения шва, ограниченная двумя плоскостями и состоящая из одного или нескольких проходов. На рис. 92, а показан шов, выполненный в четыре слоя (в четыре прохода), а на рис. 92, б в четыре слоя (семь проходов).

§ 30. РЕЖИМЫ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ

Режимом сварки называют совокупность характеристик сварочного процесса, обеспечивающих получение сварных соединений заданных размеров, формы и качества. При ручной сварке такими характеристиками являются: диаметр электрода, сила сварочного тока, скорость перемещения электрода вдоль шва, род тока, полярность и др.

Примерное соотношение между диаметром электрода и толщиной листов свариваемого изделия приведено ниже:

Толщина свариваемого изделия, мм . . .	1—2	3	4—5	6—12	13 и более
Диаметр электрода, мм . . .	1,5—2,0	3	3—4	4,0—5,0	5,0 » »

При сварке многопроходных швов стремятся сварку всех проходов выполнять на одних и те же режимах. Исключением является первый проход. При ручной сварке многопроходных швов первый проход выполняется электродами диаметром 3—4 мм, так как применение электродов большего диаметра затрудняет провар корня шва.

При определении числа проходов (в дальнейшем все расчеты числа проходов, площади сечения металла шва будут рассматриваться только для наплавленного металла) следует учитывать, что сечение первого прохода не должно превышать 30—35 мм² и может быть определено по формуле

$$F_1 = (6 \div 8) d_{эл}, \quad (101)$$

а последующих проходов — по формуле

$$F_c = (8 \div 12) d_{эл}, \quad (102)$$

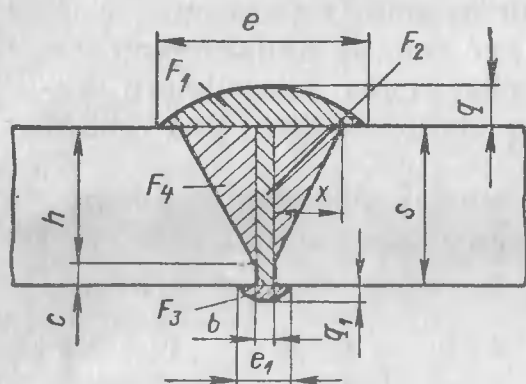
где F_c — площадь поперечного сечения последующих проходов, мм².

Для определения числа проходов и массы наплавленного металла требуется знать площадь сечения швов.

Площадь сечения швов представляет собой сумму площадей элементарных геометрических фигур их составляющих. Тогда площадь сечения одностороннего стыкового шва, выполненного без зазора, можно определить по формуле

$$F \cup = 0,75eq, \quad (103)$$

а при наличии зазора в соединении по формуле



$$F \cap = 0,75eq + sb. \quad (104)$$

Площадь сечения стыкового шва с V-образной разделкой и с подваркой (рис. 93) определяется как сумма геометрических фигур

$$F \nabla = F_1 + F_2 + F_3 + 2F_4. \quad (105)$$

Рис. 93. Геометрические элементы площади сечения стыкового шва

Из указанных в правой части уравнения элементарных площадей формулы для расчета трех из них установлены, а площадь прямоугольного треугольника F_4 можно определить

$$F_4 = hx/2,$$

где $x = h \operatorname{tg} \alpha/2$, тогда

$$F_4 = \frac{h^2 \operatorname{tg} \alpha/2}{2}, \quad (106)$$

но рассматриваемая нами площадь V-образного шва состоит из двух прямоугольных треугольников, поэтому

$$2F_4 = h^2 \operatorname{tg} \alpha/2.$$

Подставляя значение элементарных площадей в формулу (105), получим

$$F \nabla = 0,75eq + bs + 0,75e_1q_1 + h^2 \operatorname{tg} \alpha/2.$$

Площадь сечения угловых швов в зависимости от формы сечения может быть определена так: нормального

$$F \triangle = k^2/2; \quad (107)$$

выпуклого

$$F \nabla = k^2/2 + 0,75eq. \quad (108)$$

Выразим гипотенузу прямоугольного треугольника через катет, тогда формула (108) примет вид

$$F \nabla = k^2/2 + 1,05kq. \quad (109)$$

Зная площадь сечения сварного шва $F_{ш}$, площадь сечения первого и последующих проходов, можем найти общее число проходов:

$$n = (F_{ш} - F_1)/F_{пр} + 1. \quad (110)$$

Расчет сварочного тока при ручной сварке производится по диаметру электрода и допускаемой плотности тока:

$$I_{св} = F_{эл}i = \pi d^2 i/4, \quad (111)$$

где i — допустимая плотность тока, А/мм².

При недостаточном токе дуга горит неустойчиво, при чрезмерном сварочном токе электрод плавится слишком интенсивно, возрастают потери на разбрызгивание, ухудшается устойчивость дуги и формирование шва.

Допустимая плотность тока зависит от диаметра электрода и вида покрытия. Чем больше диаметр электрода, тем меньше допустимая плотность тока, так как ухудшаются условия охлаждения.

Вид покрытия оказывает влияние на скорость плавления электрода, а следовательно, на нужную плотность тока в связи с их различной теплопроводностью и характером протекания металлургических процессов. Величины допускаемой плотности тока в электроде в зависимости от диаметра стержня и вида покрытия приведены в табл. 27.

Для приближенных подсчетов сварочный ток может быть определен по эмпирической формуле

$$I_{св} = kd, \quad (112)$$

Таблица 27. Допускаемая плотность тока (А/мм²) в электроде при ручной дуговой сварке

Вид покрытия	Диаметр стержня электрода, мм			
	3	4	5	6
Кислое, рутиловое	14—20	11,5—16	10—13,5	9,5—12,5
Основное	13—18,5	10—14,5	9—12,5	8,5—12,0

где d — диаметр стержня электрода, мм; k — коэффициент, принимаемый в зависимости от диаметра электрода:

d , мм	1—2	3—4	5—6
k , А/мм	25—30	30—45	45—60

Напряжение на дуге при ручной дуговой сварке изменяется в пределах 20—36 В и при проектировании технологических процессов ручной сварки не регламентируется.

Скорость перемещения дуги (м/ч) может быть определена так:

$$v_{п.д} = \alpha_n I_{св} / (\gamma F_n 100), \quad (113)$$

где α_n — коэффициент наплавки, г/(А·ч); γ — плотность наплавленного металла, г/см³; F_n — площадь поперечного сечения наплавленного металла за данный проход, см².

Скорость перемещения дуги (см/с)¹ может быть определена по формуле

$$v_{п.д} = \alpha_n I_{св} / (3600 \gamma F_n).$$

§ 31. ТЕХНОЛОГИЯ РУЧНОЙ СВАРКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМ ЭЛЕКТРОДОМ

Зажигание сварочной дуги производится кратковременным прикосновением конца электрода к изделию. Вследствие протекания тока короткого замыкания и наличия контактного сопротивления торец электрода быстро нагревается до высокой температуры, при которой после отрыва электрода под действием термо- и авто-

¹ Для упрощения расчетов в уравнение (113) можно подставить площадь сечения шва не в квадратных сантиметрах, а в квадратных миллиметрах. Это допустимо, потому что F_n (мм²) численно равна объему 1 м шва (см³). Тогда уравнение примет вид $v_{п.д} = \alpha_n I_{св} / (F_n \gamma)$.

электронной эмиссии происходит ионизация газового промежутка, и возникает сварочная дуга. Для надежного зажигания дуги сварщик должен отводить электрод от изделия на высоту 4—5 мм, так как при большем расстоянии между концом электрода и изделием дуга не возникает.

Обычно зажигание дуги осуществляется либо прямым отрывом электрода после короткого замыкания (рис. 94, а), либо скользящим движением конца электрода с кратковременным касанием изделия (рис. 94, б). Первый обычно называют зажиганием «впритык», второй — зажиганием «спичкой».

Ведение дуги производится таким образом, чтобы обеспечить проплавление свариваемых кромок и получить требуемое качество наплавленного металла при хорошем формировании. Это достигается поддержанием постоянства длины дуги и соответствующим перемещением конца электрода (рис. 95).

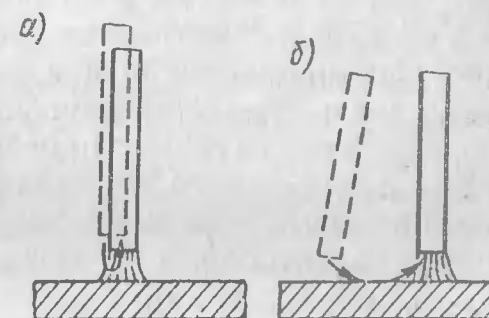


Рис. 94. Способы зажигания дуги

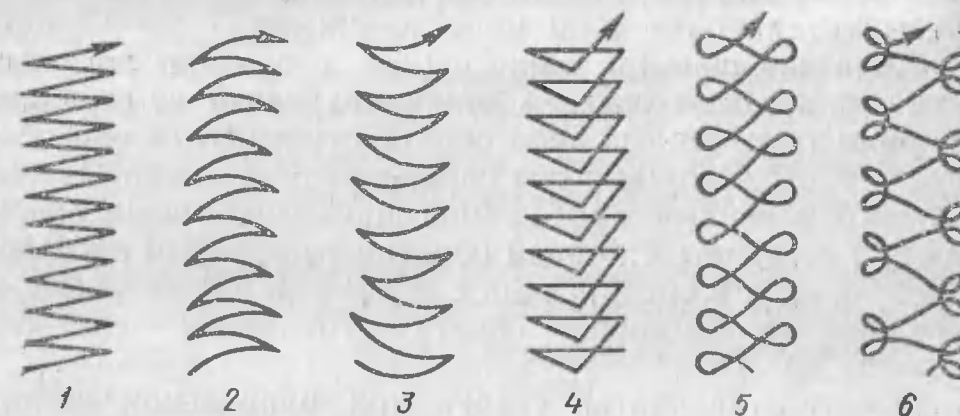


Рис. 95. Виды поперечных перемещений конца электрода: 1, 2 и 3 — наиболее часто применяемые; 4 — при увеличенном прогреве середины; 5, 6 — при увеличенном прогреве кромок

Если продольное перемещение электрода производить без поперечных колебаний, то ширина валика обычно составляет: $b = (0,8 \div 1,5) d_{эл}$.

Такие валики применяют при выполнении первого слоя в разделку многопроходного шва, при сварке тон-

кого металла, а также при сварке с опиранием на чехольчик толстого покрытия.

Нормально сформированный однопроводный шов в большинстве случаев должен иметь ширину $b = (2 \div 4) d_{эл}$.

Это достигается при поперечных колебаниях конца электрода в необходимых пределах.

Длина дуги при ручной сварке в зависимости от условий сварки и марки электрода должна быть в пределах $(0,5 \div 1,2) d_{эл}$. Чрезмерное уменьшение длины дуги ухудшает формирование шва и может привести к короткому замыканию. Чрезмерное увеличение длины дуги приводит к снижению глубины провара, увеличению разбрызгивания электродного металла и ухудшению качества шва как по форме, так и по механическим свойствам, а при сварке электродами с покрытием основного вида — и к порообразованию.

Способы выполнения швов по длине и сечению

Способы выполнения швов зависят от их длины и толщины свариваемого металла. Условно считают швы длиной до 250 мм короткими, длиной 250—1000 мм — средними, а более 1000 мм — длинными.

Короткие швы по длине обычно сваривают напроход (рис. 96, а). Швы средней длины сваривают от середины к краям (рис. 96, б), либо обратноступенчатым способом (рис. 96, в). Длинные швы однопроводных стыковых соединений и первый проход многопроходных швов сваривают от середины к концам обратноступенчатым способом (рис. 96, г), а в соединениях с угловыми швами также от середины к концам обратноступенчатым способом (рис. 96, д).

Обратноступенчатая сварка при правильном выборе длины ступени является наиболее эффективным методом уменьшения неодновременности выполнения однопроводного шва и поэтому приводит к меньшим остаточным деформациям. Достигается это за счет того, что разбивка шва на участки производится с таким расчетом, чтобы при окончании сварки каждого последующего участка начало предыдущего участка имело определенную температуру. Таким образом, меняя длину участка и подгоняя энергию дуги, можно подобрать определенный

температурный перепад на границах между двумя ступенями. Обычно он составляет 200—300 °С, что достигается при однопроводной сварке, если длина ступени выдерживается в пределах длины, получаемой при расплавлении одного электрода с сечением валика не менее 1,0—1,5 сечения электрода. Это также приводит к уменьшению остаточных деформаций, потому что шов на каждом участке выполняется по расширенному зазору. При охлаждении одновременно с уменьшением ширины шва

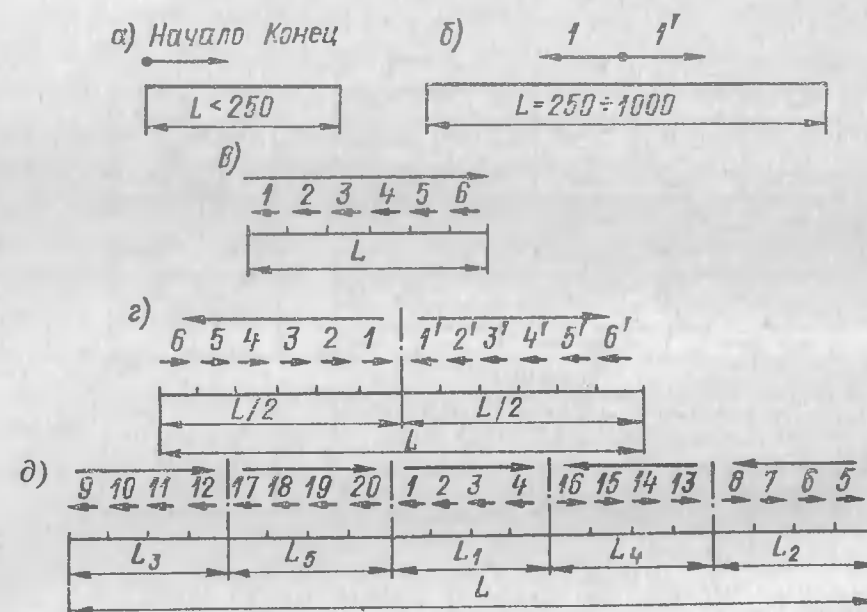


Рис. 96. Способы выполнения швов по длине

уменьшается и первоначально расширенный зазор, вследствие чего остаточные деформации становятся минимальными.

При сварке стыковых или угловых швов большого сечения шов выполняется несколькими слоями. При этом каждый слой средней и верхней части шва может выполняться как за один проход (см. рис. 92, а), так и за два и более проходов (см. рис. 92, б). С точки зрения уменьшения остаточных деформаций из плоскости первый метод предпочтительнее второго. Однако слой шириной 14—16 мм бывает затруднительно сваривать в один проход; кроме того, в таких швах в связи с большим сечением проходов наблюдается относительно меньшая ударная вязкость (см. рис. 62), поэтому чаще применяется многопроходный способ сварки швов большого сечения.

При сварке толстого металла выполнение каждого слоя напроход является нежелательным, так как это может привести к значительным деформациям, а также к образованию трещин в первых слоях. Образование трещин вызывается тем, что первый слой шва перед наложением второго успевает полностью (или почти полностью) остыть. Вследствие большой разницы в сечениях наплавленного слоя и свариваемого металла все деформации, возникающие при остывании неравномерно нагретого ме-

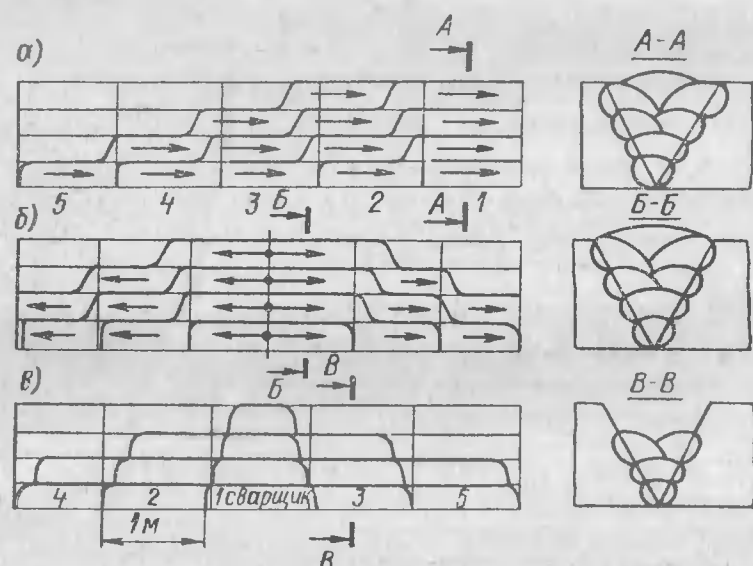


Рис. 97. Сварка длинных многослойных швов

талла, концентрируются в металле шва; при этом запас пластичности металла первых слоев может оказаться недостаточным, что приводит к трещинообразованию.

Для предотвращения образования трещин заполнение разделки при сварке толстого металла следует производить так, чтобы каждый последующий слой накладывался на еще не успевший остыть предыдущий слой, для чего требуется обеспечить малый интервал времени между наложением отдельных слоев. Это достигается применением каскадного метода заполнения разделки (рис. 97, а), заполнением горкой (рис. 97, б) и применением блочного метода (рис. 97, в).

При каскадном методе заполнения шва весь шов разбивается на короткие участки в 200 мм, и сварка производится таким образом, что по окончании сварки первого слоя первого участка, не останавливаясь, продолжают выполнение первого слоя на соседнем участке.

При этом каждый последующий слой накладывается на неуспевший еще остыть металл предыдущего слоя.

Сварка горкой является разновидностью каскадного способа и ведется двумя сварщиками одновременно, от середины к краям.

Эти два метода выполнения шва представляют собой обратнo-ступенчатую сварку не только по длине, но и по сечению шва.

Блочный метод заключается в том, что весь шов по длине делится на равные участки длиной примерно в 1 м; каждый участок — блок выполняется определенным сварщиком, причем сварка начинается со среднего блока. Сразу же после выполнения первого прохода на первом участке сварку начинают еще два сварщика и т. д., пока все участки по длине шва не будут закреплены за сварщиками. Такое одновременное выполнение многопроходного шва по длине и сечению обеспечивает наиболее равномерное распределение температуры, что значительно уменьшает общие остаточные деформации как в плоскости свариваемых листов, так и из плоскости. Блочный метод можно успешно применять даже для сварки толстолистовой закаливающейся стали.

Особенности выполнения швов в положениях, отличных от нижнего

Сварка швов в положениях, отличных от нижнего, имеет ряд особенностей.

При сварке в вертикальном положении перенос электродного металла в сварочную ванну осуществляется перпендикулярно к силе тяжести. Поэтому при вертикальной сварке сварочный ток должен быть снижен на 15—20 % по сравнению с нижней сваркой, а диаметр электрода не должен превышать 4—5 мм.

Сварка вертикальных швов выполняется снизу вверх (см. рис. 98, а) или сверху вниз (рис. 98, б). Наиболее удобной является сварка снизу вверх. При этом дуга возбуждается в самой нижней точке шва.

Как только нижняя часть сварочной ванночки начинает кристаллизоваться, образуется площадка, на которой удерживаются капли металла; при этом электрод отводится несколько вверх и располагается углом вперед (рис. 98, а, положение 2).

При сварке сверху вниз в начальный момент электрод располагается перпендикулярно к поверхности, и дуга возбуждается в верхней точке шва. По образовании заметной капли жидкого металла на свариваемой детали электрод наклоняется вниз под углом $10-15^\circ$, так, чтобы дуга была направлена на расплавленный металл (рис. 98, б, положение 2). Выполнение сварки сверху вниз значительно труднее, чем снизу вверх. И она обычно применяется при сварке тонкого металла.

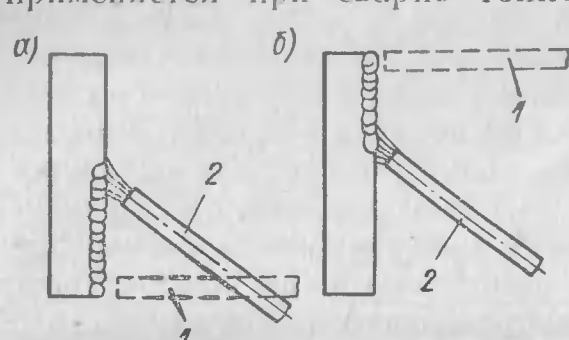


Рис. 98. Сварка вертикальных швов: 1 — положение электрода при начале сварки; 2 — положение электрода в процессе выполнения сварки

Для улучшения условий формирования шва при сварке вертикальных швов должна поддерживаться возможно короткая дуга. При сварке снизу вверх поперечные колебания можно вовсе не производить, а в случае сварки с поперечными колебаниями они должны иметь меньшую амплитуду с тем, чтобы ширина валика не превышала $1,5-2,0$ диаметра электрода.

Сварка горизонтальных швов сложнее сварки вертикальных швов и выполняется сварщиками более высокой квалификации. При сварке стыковых швов с разделкой кромок скос кромок делают с одной стороны верхнего стыкуемого листа.

При выполнении верхних уширенных валиков поперечные перемещения конца электрода совершают под углом около 45° по отношению к оси шва, что облегчает отложение наплавленного металла. Требования по сварочному току и диаметру электрода такие же, как и при вертикальной сварке.

Сварка потолочных швов по своему выполнению является наиболее трудной, так как сила тяжести в этом случае препятствует переносу капель металла с электрода в сварочную ванну, и капли металла стремятся стечь вниз. Для того чтобы силы, способствующие переносу металла с электрода в шов, и силы, удерживающие расплавленный металл ванны от вытекания, преодолели силу тяжести, необходимо, чтобы объем сварочной ванны был малым. Поэтому потолочную сварку выполняют электро-

дами диаметром не более 4 мм, при короткой дуге, узкими валиками, сварочным током на $20-25\%$ меньше, чем при нижней сварке.

Пониженные режимы и неудобство выполнения сварки в потолочном положении резко снижают производительность труда сварщика. Поэтому там, где это возможно, изделия следует располагать таким образом, чтобы швы сваривались в нижнем положении.

Пути повышения производительности труда при ручной сварке

Повышение производительности труда при ручной сварке может быть достигнуто за счет двух групп мероприятий: организационных и технических.

Такие организационные мероприятия, как, например: устройство пунктов питания сварочным током, позволяющих производить быстрое подключение и отключение сварочных проводов, рациональное устройство электрододержателя, позволяющего уменьшить время на смену электродов, применение механизированного инструмента для очистки кромок деталей и шва от шлака, приспособлений для быстрого поворота деталей в процессе сварки и некоторые другие позволяют значительно повысить производительность труда.

Наряду с организационными мероприятиями, направленными на увеличение производительности труда, большое значение имеет разработка технических мероприятий по сокращению основного времени сварки.

По формуле (21) основное время сварки определяется так:

$$t_o = F_n \gamma l / \alpha_n I_{св}. \quad (114)$$

Из этого уравнения следует, что для уменьшения основного времени сварки необходимо стремиться к уменьшению площади поперечного сечения наплавленного металла и к увеличению коэффициента наплавки и сварочного тока. Уменьшение площади сечения наплавленного металла при заданной толщине может быть достигнуто применением Х-образной подготовки вместо V-образной (см. рис. 90) и др.

Увеличить производительность труда можно и применением электродов, имеющих более высокий коэффициент наплавки. Так, замена электродов марки МР-3,

имеющих коэффициент наплавки 8,5 г/(А·ч), электродами ИТС-1, содержащими в покрытии железный порошок, коэффициент наплавки которых 12 г/(А·ч), сократит основное время сварки в 1,5 раза.

Значительное увеличение производительности может быть достигнуто за счет увеличения сварочного тока, принимаемого по верхнему пределу, рекомендуемому для данного диаметра, а также за счет применения электродов повышенных диаметров при одновременном увеличении сварочного тока. В ряде случаев повышение производительности труда может быть достигнуто опиранием на чехольчик покрытия, пучком электродов, трехфазной дугой, наклонным и лежащим электродом.

Сварка наклонным электродом позволяет одному рабочему обслуживать три-четыре поста, что обеспечивает повышение производительности труда даже по сравнению с полуавтоматической сваркой.

При сварке методом опирания (с глубоким проваром), который также называют сваркой погруженной дугой, применяют электроды с большим коэффициентом покрытия ($k_{II} = 0,5 \div 0,6$). Сила сварочного тока увеличивается против обычно применяемой на 20—40 % и выбирается по формуле $I_{св} = (60 \div 70) d_{эл}$.

После зажигания дуги и образования чехольчика электрод размещают под углом 15—20° к вертикали, опирают чехольчиком покрытия о свариваемый металл (рис. 99) и, производя все время легкий нажим на электрод по его оси, перемещают по линии наложения валика или шва без поперечных колебаний. Скорость движения электрода подбирается такой, чтобы расплавленный металл и шлак оставались позади электрода во избежание замыкания электрода со свариваемым металлом через расплавленный металл. Как правило, скорость перемещения дуги в этом случае в 1,5 раза выше по сравнению с обычными способами ручной сварки. Увеличенная мощность сварочной дуги, концентрированный ввод теплоты, быстрое перемещение электрода и интенсивное вытеснение расплавленного металла сварочной ванны из-под дуги за счет давления дуги создают условия для глубокого провара при минимальном разбрызгивании. Этот метод находит применение при сварке односторонних угловых и стыковых швов различных изделий, когда увеличение проплавления основного металла не вызывает опасности появления кристаллизационных трещин.

Для сварки стержневых изделий (стержней, арматуры, рельсов и т. п.) иногда применяют ванный метод сварки. Сущность его состоит в том, что стык помещается в специальную стальную форму в виде скобы с зазором между торцами стержней 12—23 мм в зависимости от диаметра стержней (рис. 100).

Сварку начинают в нижней части формы в зазоре, при этом в течение всего времени ванну металла поддерживают в жидком состоянии, для чего смену электродов производят быстро. Сварку ведут одним или несколькими электродами («гребенкой»), зажатыми в специальный электрододержатель, до заполнения металлом всей формы несколько выше поверхности стержней.

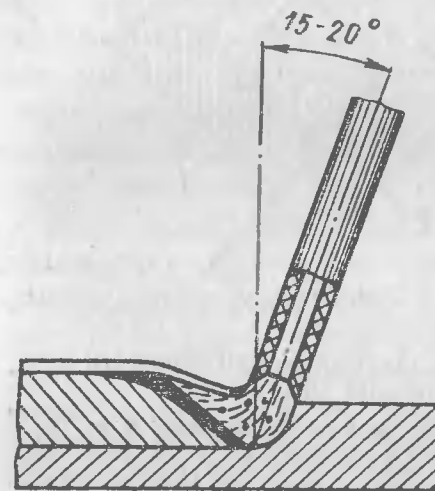


Рис. 99. Схема сварки опиранием на чехольчик

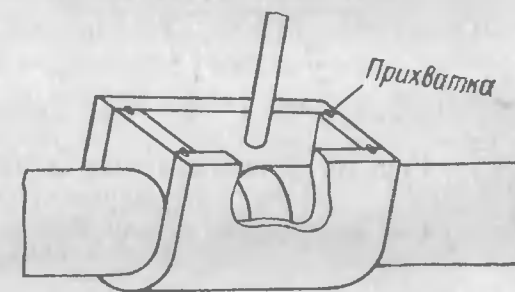


Рис. 100. Сварка горизонтальных стержней ванным методом

С целью уменьшения расхода стали на стальные формы иногда применяют разъемные медные или керамические формы.

Сварка лежащим электродом заключается в том, что в разделку стыкового соединения или в тавровое соединение в положении «лодочка» укладывается толстопокрый электрод, прижимаемый к свариваемым изделиям тяжелым медным бруском, имеющим продольную канавку для помещения под ним электрода (рис. 101).

Брусок изолируют от изделия бумагой для предупреждения обрыва дуги из-за деформации электрода при его расплавлении. Недостатком сварки лежащим электродом является невозможность регулирования сечения валика при данном диаметре электрода. К непокрытому концу электрода присоединяется с помощью специального зажима токоподвод. Дуга зажигается замыканием другого конца электрода на изделие с помощью угольного элек-

трода. После возбуждения дуга перемещается под бру- сом по длине электрода, постепенно расплавляя электрод и основной металл, и образует шов. Сварку лежачим электродом целесообразно использовать, когда доступ для выполнения сварки обычными способами затруднен. При этом способе сварки длина покрытой части электрода принимается равной длине шва. Длина электрода может быть в пределах до 1200 мм, диаметр — до 8 мм. Толщина электродного покрытия несколько больше, чем при обыч-

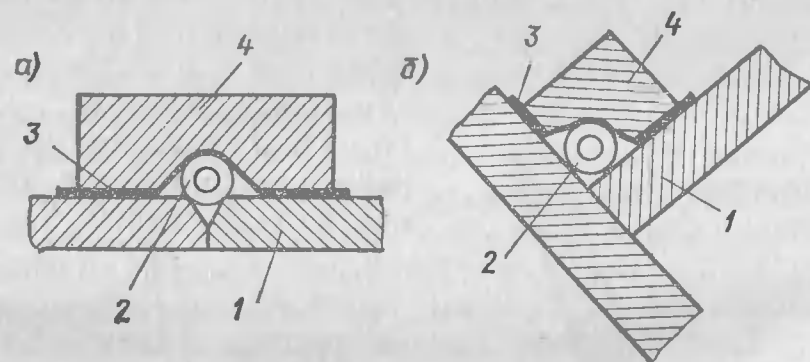


Рис. 101. Схема сварки лежачим электродом: стыковых (а) и тавровых соединений (б):

1 — свариваемые детали; 2 — электрод; 3 — прокладка; 4 — медный брус

ной электродуговой сварке плавящимся электродом. Сечение шва получается примерно равным сечению электрода. Сварка лежачим электродом обеспечивает высокое качество металла шва, повышает производительность по сравнению с обычной дуговой сваркой в 1,5—2 раза благодаря возможности применения электродов большего диаметра при соответственном увеличении силы тока, уменьшает потери металла на угар и разбрызгивание, а также за счет того, что оператор может одновременно обслуживать несколько постов. Режимы сварки лежачим электродом приведены в табл. 28.

Сварка наклонным электродом — дуговая сварка, при которой плавящийся электрод расположен наклонно вдоль свариваемой кромки и по мере расплавления движется под действием груза или пружины, расположенных на обойме штатива.

При сварке электрод закрепляют в специальном электрододержателе, размещенном на штативе, устанавливаемом на изолированную подкладку, расположенную на поверхности изделия. Нижний конец электрода с высту-

Таблица 28. Режим сварки лежачим электродом угловых и стыковых швов

Катет углового шва, мм	Толщина листов, мм	Вид разделки стыкового шва	Диаметр электрода, мм	Сила сварочного тока, А
6,0—6,5	5	Без скоса	5	200—240
6,5—7,0	6,5	Без скоса	6	260—300
8	8	V-образная (70°)	8	340—380
8,5—10,0	—	—	8	380—450
—	10—12	V-образная (70°)	8	340—380

пающим краем толстого покрытия опирается на свариваемое изделие (рис. 102). Дуга возбуждается замыканием конца электрода на изделие угольным электродом или автоматически при наличии ионизирующей обмазки на торце электрода.

При плавлении электрода на его конце образуется чехольчик, препятствующий короткому замыканию между электродом и изделием. По мере расплавления и опуска-

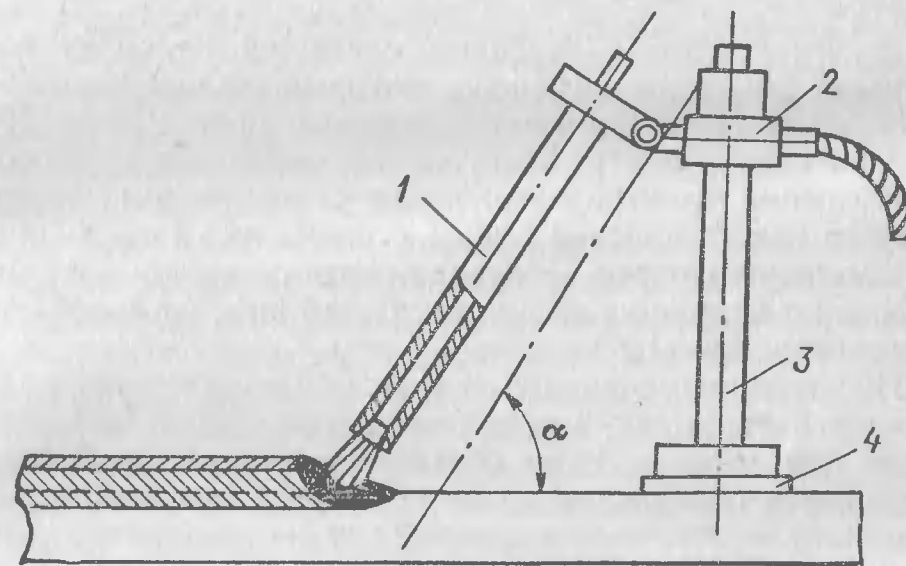


Рис. 102. Схема сварки наклонным электродом:

1 — электрод; 2 — обойма; 3 — штатив; 4 — изолирующая подкладка

ния электрода образуется шов. Сечение шва регулируется изменением угла наклона электрода. При наклонном электроде сварочный ток принимается таким же, как и при ручной сварке плавящимся электродом.

Механизированная сварка наклонным электродом с использованием специальных установок находит при-

менение в промышленности, особенно в судостроении, для сварки угловых и тавровых соединений без разделки кромок и в меньшей мере для стыковых соединений.

Кромки деталей, подлежащих сварке, должны быть очищены от ржавчины, жира и других загрязнений. Катеты прихваток при сборке не должны превышать 4 мм, длина прихваток и расстояние между ними должны соответствовать действующим инструкциям.

Для сварки применяют специальные установки «Огонек» различной модификации. Сварка наклонным электродом производится как переменным, так и постоянным током. Сварку на постоянном токе односторонних угловых швов не применяют вследствие отрицательного влияния сильного магнитного поля. Двусторонние угловые швы на постоянном токе варят одновременно с двух сторон по методу «дуга в дугу». Расхождения между сварочными дугами при этом должны соответствовать 30—100 мм.

На переменном токе можно выполнять односторонние и двусторонние угловые швы без применения метода «дуга в дугу».

Режим сварки в основном складывается из следующих величин: диаметра электрода, который обычно равен 5—6 мм; силы сварочного тока, который принимается 35—40 А на 1 мм диаметра электрода; коэффициента скорости перемещения электрододержателя с электродом, определяемого как отношение длины полученного шва к длине расплавленной части электрода. Этот коэффициент устанавливают исходя из заданного катета шва, он колеблется в пределах 0,8—1,5.

При механизированной сварке наклонным электродом заделка катета шва, как правило, происходит автоматически при механическом обрыве дуги и обеспечивается сплошность шва по его длине. В случае получения незаделанного катета или наличия других дефектов по его длине они исправляются вручную электродами, предназначенными для сварки данной марки стали, или полуавтоматической сваркой в углекислом газе соответствующей проволокой.

Техническая характеристика установки «Огонек-1»:

Номинальный сварочный ток, А	250
Напряжение питания АСН-4 от сети переменного тока, В	12,36
Диаметр электрода, мм	5—6
Длина электрода, мм	700

Длина кабеля от АСН-4, м	30
Габаритные размеры, мм	850×480×200
Масса с токоподводящим кабелем, кг	7,2

Автомат АСН-4 включается в сварочную цепь последовательно с установкой и предназначен для автоматического прекращения процесса сварки при длине огарка электрода 50—60 мм и ограничения напряжения на электрододержателе до 12 В при окончании сварки или случайном обрыве дуги.

Сварка швов угловых и тавровых соединений на сварочной установке «Огонек-1» производится при малом угле наклона электрода к линии сварки. Первоначальный угол наклона электрода к линии сварки составляет 10—13° при длине электрода 700 мм, в конце сварки 35—40°. Угол между электродом и стенками тавра составляет $45 \pm 2^\circ$ (рис. 103).

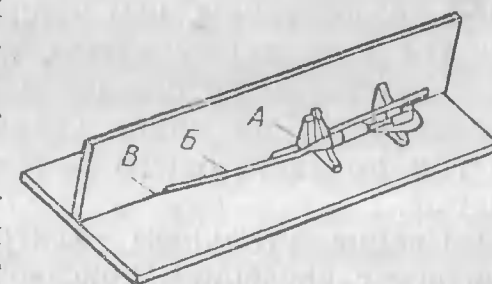


Рис. 103. Схема сварки наклонным электродом на установке «Огонек»: А — магнит; Б — электрод; В — линия сварки

Для подготовки установки «Огонек-1» к сварке необходимо выполнить следующие операции: прижать установку в угол соединения таким образом, чтобы обе ее плоскости вошли в соприкосновение с вертикальной и горизонтальной полками тавра свариваемого изделия; зафиксировать положение установки перекидным магнитом, который крепится к вертикальной или горизонтальной полке тавра; вставить электрод в электрододержатель; отвести рукоятку назад до щелчка, пригнать конец электрода к линии сварки и возбудить дугу нажатием пусковой кнопки; дать возможность электроду оплавляться при постоянном поджатии к линии сварки под действием силы пружины.

За время сгорания электрода сварщик должен успеть произвести настройку на линию сварки следующих трех—шести сварочных установок «Огонек-1».

Когда останется огарок электрода длиной 50 мм, дуга автоматически оборвется. Сварочную установку на линии сварки фиксируют с таким расчетом, чтобы после отвода рукоятки в рабочее положение торец электрода

упирался в предшествующий шов на 15—20 мм от линии его конца.

Сварка на установках «Огонек-1» выполняется как слева направо, так и справа налево. Вследствие небольших габаритных размеров установка «Огонек-1» может предназначаться для использования в труднодоступных местах.

Дуговая сварка угольным электродом в связи с большой термоэлектронной эмиссией с горячего катода обладает большой устойчивостью при малых токах, что является одним из ценных ее свойств.

Угольная дуга более чувствительна к различным внешним воздействиям, чем металлическая дуга, сильнее поддается магнитному дутью, легче отклоняется в сторону под действием потока газов. Для стабилизации дуги рекомендуется по линии сварки наносить узкую полоску легко ионизирующего материала в виде порошка или пасты.

Сварка угольным электродом может также выполняться с введением присадочного металла. Присадочный металл в виде прутка с тонким ионизирующим покрытием для улучшения устойчивости дуги вводится сварщиком в плавильную зону или предварительно помещается на свариваемые кромки и расплавляется вместе с ними.

Иногда для сварки легкоплавких металлов малых толщин (свинец, цинк и др.), пайки твердыми припоями, нагрева металла и других случаев применяют угольную

дугу косвенного действия. Питание дуги косвенного действия производится переменным током, обеспечивающим равномерное обгорание обоих электродов.

Сварка низколегированных низкоуглеродистых конструкционных сталей

Эти стали под действием обычного термического цикла сварки не закаляются. Они имеют $\sigma_B = 440 \div 540$ МПа/мм² и $\sigma_T = 300 \div 400$ МПа/мм².

Химический состав наиболее распространенных низколегированных сталей, применяемых для производства сварных конструкций, приведен в табл. 29. Эти стали могут успешно свариваться теми же способами, что и низкоуглеродистые стали. При ручной сварке их следует применять электроды, которые дадут возможность получить металл шва, обладающий такими же механическими свойствами, как и основной металл. Для сварки этих сталей рекомендуются электроды типа Э-50А. Но если учесть легирование металла шва элементами из основного металла, то для сварки этих сталей можно применять электроды типа Э-46А. При сварке этих сталей под слоем флюса и в среде углекислого газа применяют те же материалы и режимы, что и при сварке низкоуглеродистых сталей, а при электрошлаковой сварке с использованием флюса АН-8 следует применять сварочную проволоку Св-10Г2 или Св-08ГСМТ.

Таблица 29. Химический состав и механические свойства некото

Марка стали	Массовое содержание			
	C	Mn	Si	Cr
10ХСНД	До 0,12	0,50—0,80	0,80—1,10	0,60—0,90
15ХСНД	0,12—0,18	0,40—0,70	0,40—0,70	0,60—0,90
14ХГС	0,11—0,16	0,90—1,30	0,40—0,70	0,50—0,80
09Г2	До 0,12	1,40—1,80	0,17—0,37	До 0,30
14Г2	0,12—0,18	1,20—1,60	0,17—0,37	» 0,30

рых низколегированных сталей по ГОСТ 19282—73

элементов, %		Механические свойства					
Ni	Cu	S	P	Толщина проката, мм	σ_B	σ_T	δ , %
					МПа/мм ²		
		не более			не менее		
0,50—0,80	0,40—0,65	0,04	0,035	4—32	540	400	19
0,30—0,60	0,20—0,40	0,04	0,035	4—32	500	350	21
До 0,30	До 0,30	0,04	0,035	4—10	500	350	22
» 0,30	» 0,30	0,04	0,035	4—20	450	310	21
» 0,30	» 0,30	0,04	0,035	4—10	470	340	21

ГЛАВА VII. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

§ 32. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ И ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА НА ФОРМУ ШВА

Сварку под слоем флюса производят голой электродной проволокой, которую подают в зону горения дуги специальным механизмом, называемым головкой автомата. Токосвод к проволоке осуществляется через скользящий контакт при прохождении проволоки через мундштук, изготавливаемый из меди.

Малый вылет электрода, отсутствие покрытия, большая скорость подачи электродной проволоки позволяют значительно увеличить силу сварочного тока по сравнению с ручной сваркой электродами тех же диаметров, что приводит к ускорению процесса плавления сварочной проволоки, увеличению глубины проплавления основного металла и, как следствие, значительному повышению производительности. Коэффициент наплавки достигает 14—16, а в некоторых случаях даже 25—30 г/(А·ч). Достаточно толстый слой флюса (до 60 мм), засыпаемого в зону сварки, расплавляется только на 30 %, делает дугу невидимой (закрытой) и обеспечивает хорошую защиту расплавленного металла от окружающего воздуха, стабильность процесса, небольшие потери на угар и разбрызгивание.

Вследствие увеличения эффективной тепловой мощности дуги может быть расширен диапазон толщин, свариваемых без скоса кромок. Так, при обычных режимах автоматической сварки встык без скоса кромок может свариваться металл толщиной до 15—20 мм. При этом увеличивается проплавление основного металла, доля участия основного металла в металле шва составляет 0,5—0,7, тем самым значительно снижается расход электродной проволоки на единицу длины шва. При сварке угловых швов увеличенная глубина провара обеспечивает (при одинаковом с ручной сваркой внешнем катете шва) большее расчетное сечение. Поэтому при автоматической сварке под флюсом угловых швов катет может назначаться меньше, чем для шва, выполняемого ручной сваркой.

На качество и работоспособность сварного соединения, выполняемого под слоем флюса, влияют не только известные нам конструктивные элементы шва, но и отношение ширины одностороннего шва к глубине провара. Коэффициент формы провара $\psi_{пр} = e/h$ может изменяться в пределах от 0,5 до 4,0. Оптимальное его значение равно 1,3—2,0. Отношение ширины шва к его выпуклости $\psi_{в} = e/q$ (коэффициент формы валика) при хорошо сформированных швах не должно выходить за пределы 7—10.

Основными параметрами режима автоматической и полуавтоматической сварки под флюсом являются сварочный ток и диаметр электродной проволоки, напряжение на дуге и скорость перемещения дуги. В зависимости от режима и технологических факторов будет меняться глубина провара, ширина шва, высота выпуклости и доля участия основного металла в металле шва.

Рассмотрим влияние каждого параметра режима и некоторых технологических факторов на указанные величины.

Влияние силы сварочного тока проявляется в том, что с увеличением сварочного тока усиливается давление столба дуги на поверхность жидкого металла, дуга больше погружается в основной металл, возрастает погонная энергия и масса расплавленного в единицу времени электродного металла. В результате этого глубина провара и доля участия основного металла в металле шва увеличивается, ширина шва почти не меняется, а высота выпуклости шва возрастает. Коэффициент формы провара и количество расплавленного флюса уменьшаются.

Увеличение диаметра проволоки при неизменном сварочном токе приводит к усилению блуждания активного пятна по сечению конца электрода и поверхности сварочной ванны, вследствие чего глубина провара и выпуклость шва уменьшаются, а ширина шва возрастает. Если же при том же токе сварку производить электродной проволокой меньшего диаметра, то это приведет к возрастанию плотности тока, в результате увеличивается глубина провара, уменьшается ширина шва и коэффициент формы провара.

Данные по влиянию сварочного тока и диаметра электродной проволоки на глубину провара приведены в табл. 30. Из приведенных данных следует, что при автоматической сварке под флюсом для получения глубины провара 5 мм при диаметре электродной проволоки 2 мм

Таблица 30. Влияние силы сварочного тока, его плотности и диаметра электродной проволоки на глубину провара

Диаметр электродной проволоки, мм	Глубина провара, мм					
	3	4	5	6	8	10
2	200 64	300 104	350 127	400 143	500 157	600 200
3	300 43	350 50	400 57	500 71	625 89	750 107
4	375 29	425 36	500 40	550 44	675 53	800 64
5	450 23	500 26	550 28	600 31	725 37	825 42
Примечание. В первой строке приведены значения сварочного тока (А), а во второй — значения его плотности (А/мм²).						

требуется сварочный ток силой 350 А, при диаметре 5 мм — 550 А.

Широкое применение электродной проволоки малых диаметров при сварке под флюсом металла заданной толщины обусловлено тем, что это приводит к снижению необходимого сварочного тока, расхода энергии, уменьшению массы и габаритных размеров применяемого оборудования.

Влияние напряжения дуги зависит в основном от длины дуги и состава газов, заполняющих дуговой промежуток. Чем больше длина дуги, тем больше и напряжение. Увеличение напряжения дуги приводит к увеличению ее подвижности, в результате чего значительно возрастает ширина шва, заметно снижается выпуклость шва, а глубина проплавления в практически встречающихся пределах изменения напряжения дуги остается почти постоянной. При увеличении толщины свариваемого металла увеличение силы тока должно сопровождаться соответствующим повышением напряжения (табл. 31).

Увеличение скорости перемещения дуги приводит к сильному отклонению столба дуги в сторону, противо-

Таблица 31. Зависимость напряжения дуги от силы сварочного тока при сварке под флюсом АН-348А

Диаметр электрода, мм	Сила сварочного тока, А	Напряжение дуги, В
2	180—300	32—34
	300—400	34—36
	500—600	36—40
5	600—700	38—40
	700—850	40—42
	850—1000	41—43

положную направлению перемещения, вследствие чего увеличивается горизонтальная составляющая давления дуги на расплавленный металл сварочной ванны, из-под дуги вытесняется больше жидкого металла, толщина слоя жидкого металла под дугой уменьшается и глубина проплавления при возрастании скорости перемещения до 25 м/ч (рис. 104, а) возрастает, несмотря на уменьшение погонной энергии. Это приводит к сокращению площади сечения шва, уменьшению ширины шва, незначительному росту выпуклости шва, увеличению доли уча-

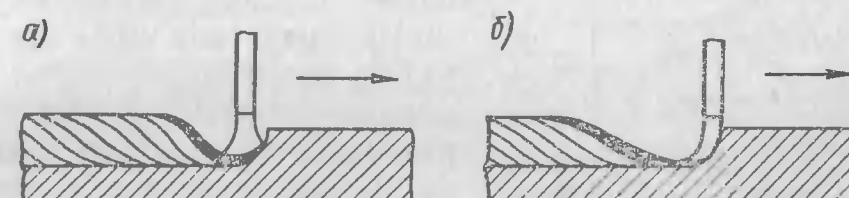


Рис. 104. Влияние скорости перемещения дуги на отклонение ее и толщину слоя жидкого металла под ней

стия основного металла в металле шва и уменьшению коэффициента формы провара. При скорости перемещения дуги больше 25 м/ч (рис. 104, б) наблюдается еще более интенсивное вытеснение жидкого металла из-под дуги, и при скоростях перемещения дуги до 40—50 м/ч глубина проплавления растет, несмотря на уменьшение погонной энергии. При дальнейшем увеличении скорости перемещения дуги влияние уменьшения погонной энергии становится преобладающим, в результате глубина провара, ширина шва и площадь сечения шва уменьшаются, а при скорости перемещения дуги 70—80 м/ч уменьшение погонной энергии сварки и ширины нагрева кромок оказывается столь значительным, что по обе стороны шва образуются краевые непровары — зоны несплавления (рис. 105).

На форму и размеры шва влияют не только основные параметры режима сварки, но и такие технологические факторы, как род и полярность тока, наклон электрода и изделия, вылет электрода, марка и структура флюса, конструктивная форма соединения и зазора.

Влияние рода тока и полярности на форму шва объясняется различным количеством теплоты, выделяющейся на катоде и аноде. При сварке под флюсом на аноде выделяется меньше теплоты, а на постоянном токе прямой

полярности глубина провара получается примерно на 40—50 % меньше, чем при сварке на обратной полярности, и на 15—20 % меньше, чем при сварке на переменном токе. В связи с этим при сварке на прямой полярности коэффициент наплавки и высота выпуклости шва больше, чем при сварке на обратной полярности.

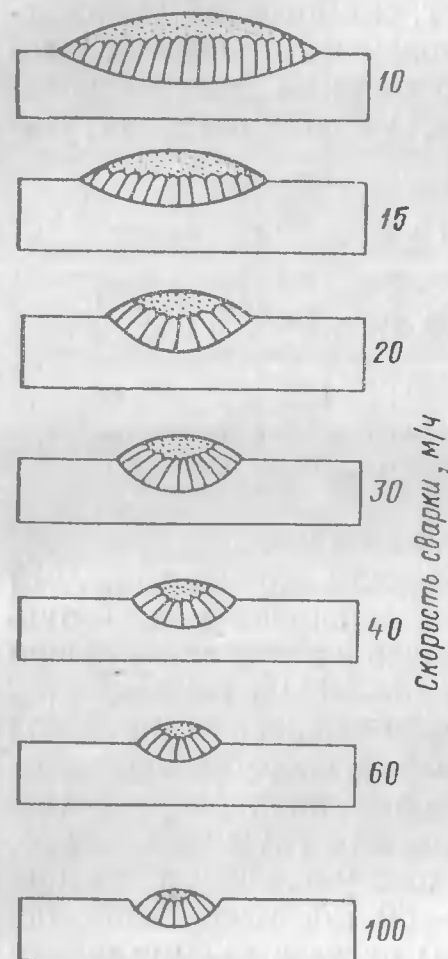


Рис. 105. Влияние скорости перемещения дуги на форму шва

нию глубины провара и уменьшению ширины шва, поэтому зоны несплавления образуются при меньшей скорости перемещения дуги, чем при вертикальном расположении электрода. Этот метод сварки применяется редко (например, при двухдуговой сварке).

Наклон изделия по отношению к горизонтальной плоскости оказывает влияние на формирование шва.

При сварке снизу вверх (на подъем) — рис. 107, а — расплавленный металл под действием собственного веса

Влияние наклона электрода сказывается на изменении положения дуги. По наклону электрода вдоль шва различают: наклон электрода углом вперед (рис. 106, а) или углом назад (рис. 106, б). В первом случае существенно уменьшается глубина провара и увеличивается ширина шва. Это имеет место возможно вследствие того, что большая часть столба дуги располагается над поверхностью основного металла и лучше прогревает свариваемые кромки, поэтому возникает возможность выполнения сварки под флюсом на скоростях несколько выше 80 м/ч без образования зон несплавления.

При наклоне электрода углом назад происходит более интенсивное вытеснение металла сварочной ванны, столб дуги глубже проникает в основной металл, что приводит к некоторому увеличению

вытекает из-под дуги в заднюю часть ванны, дуга глубже погружается в основной металл, подвижность дуги уменьшается, что приводит к увеличению глубины провара и уменьшению ширины шва.

Если угол наклона изделия при сварке под флюсом будет больше, чем 6° , то по обе стороны шва могут образовываться подрезы.

При сварке сверху вниз (на спуск) — рис. 107, б — жидкий металл под действием собственного веса подтекает

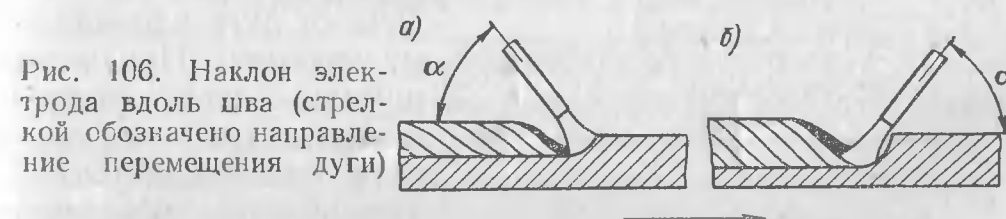


Рис. 106. Наклон электрода вдоль шва (стрелкой обозначено направление перемещения дуги)

под столб дуги, что приводит к увеличению толщины слоя металла под ним и усилению блуждания дуги по поверхности сварочной ванны. В результате уменьшается провар.

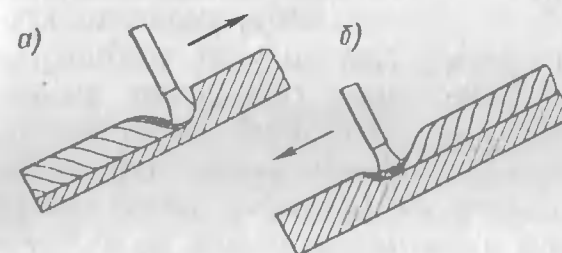


Рис. 107. Влияние положения свариваемого изделия и направления сварки на формирование шва

Изменение вылета электрода и марки флюса приводит к изменению условий выделения теплоты. Увеличение вылета электрода вызывает усиление предварительного подогрева электрода проходящим током и возрастание скорости его плавления и коэффициента наплавки. Суммарное напряжение при этом несколько увеличивается, а сварочный ток и глубина провара уменьшаются. Особенно заметно влияние вылета электрода при полуавтоматической сварке проволокой диаметром 1,0—2,5 мм. В этом случае колебания в вылете электрода в пределах 8—10 мм могут привести к резкому ухудшению формирования шва.

Флюсы отличаются стабилизирующими свойствами, плотностью, газопроницаемостью в жидком состоянии и вязкостью. С повышением стабилизирующих свойств флюса увеличиваются длина дуги и напряжение, вследствие чего возрастает ширина шва и уменьшается глубина

провара. Влияние плотности флюса на форму шва связано с тем, что изменение вызывает соответствующее изменение объема газовой полости в расплавленном шлаке, окружающем столб дуги. Чем больше плотность флюса, тем меньше объем газовой полости (что уменьшает блуждание дуги), возрастает давление в полости и расплавленный металл легче оттесняется из-под дуги. Прослойка жидкого металла под дугой становится меньше

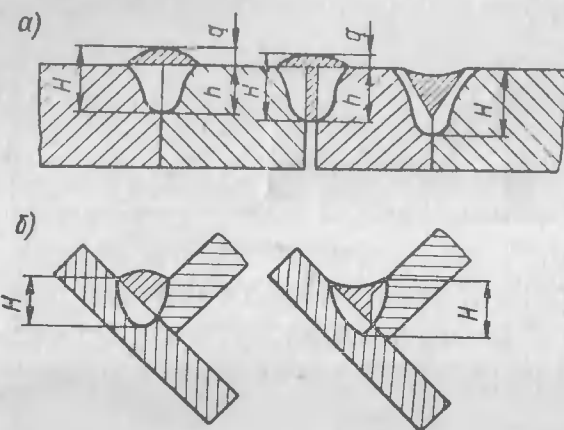


Рис 108. Влияние подготовки кромок на форму шва: а — стыковое соединение; б — угловое соединение

и улучшается теплоотдача от дуги к основному металлу. При этом ширина шва уменьшается, глубина провара увеличивается. С уменьшением объемной массы, например, при использовании перманентного флюса, все происходит наоборот. Зазор, разделка кромок и вид соединения шва оказывают незначительное влияние на форму шва: очертание провара и общая высота шва H остаются практически постоянными. Они влияют главным образом на соотношение долей участия основного и наплавленного металла в шве. Чем больше зазор или разделка, тем меньше доля основного металла в металле шва (рис. 108). Из рисунка также следует, что в зависимости от соотношения сечения зазора или разделки и наплавленного металла, шов может быть выпуклым, нормальным или вогнутым. Поскольку общая высота шва, выполненного под флюсом, практически не зависит от зазора и разделки кромок, угловой шов таврового сечения можно приравнять к стыковому шву, выполненному в разделку кромок с углом раскрытия 90° .

Кроме всего указанного, на форму и качество швов сварных соединений существенное влияние оказывает зазор между деталями. Если между свариваемыми кромками листов имеется неравномерный зазор, то при ручной и полуавтоматической сварке открытой дугой сварщик соответствующим движением электрода и изменением скорости перемещения дуги может до некоторой степени

выправить этот дефект сборки и обеспечить требуемую форму шва, а при автоматической сварке это осуществить невозможно. Плохая сборка, не обеспечивающая нужные зазоры для получения качественного шва, является основным фактором, сдерживающим внедрение большинства способов автоматической сварки.

§ 33. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ВЫПОЛНЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Стыковые соединения автоматической сваркой могут выполняться односторонними и двухсторонними швами с разделкой и без разделки кромок. Швы с разделкой кромок могут быть односторонними и многопроходными.

Для повышения производительности труда швы стремятся выполнять односторонними, но при сварке металла больших толщин приходится применять многопроходную сварку.

Односторонняя автоматическая сварка под флюсом

Односторонняя автоматическая сварка без разделки кромок с неполным проваром (сварка на весу) — рис. 109, а — должна выполняться на таком режиме, чтобы непроплавленный слой основного металла мог удерживать сварочную ванну. Режим подбирается из расчета провара не более 0,6—0,7 толщины свариваемых деталей. Однако в большинстве случаев при односторонней сварке требуется обеспечить полный провар всего сечения; тогда необходимо принимать меры по предотвращению вытекания расплавленного металла и поэтому односторонние стыковые соединения сваривают: на остающейся стальной подкладке, в замок; после ручной подварки с обратной стороны стыка; на медной или флюсо-медной подкладке, на флюсовой подушке.

Сварка на остающейся стальной подкладке (рис. 109, б) применяется для соединения из металла толщиной до 10 мм. Подкладка должна быть из того же металла, что и свариваемая сталь. Зазор между подкладкой и кромками не должен превышать 0,5—1,0 мм. Толщину стальной подкладки принимают от 0,3 до 0,5 толщины свариваемого металла, а ширину 4—5 толщин.

При сварке стыка подкладка частично проплавляется и приваривается к нижней части кромок, что и обеспечивает полный провар стыкового соединения. Применяется в тех случаях, когда не представляется возможным выполнить шов с обратной стороны соединений, например при сварке цилиндрических сосудов небольших диаметров,

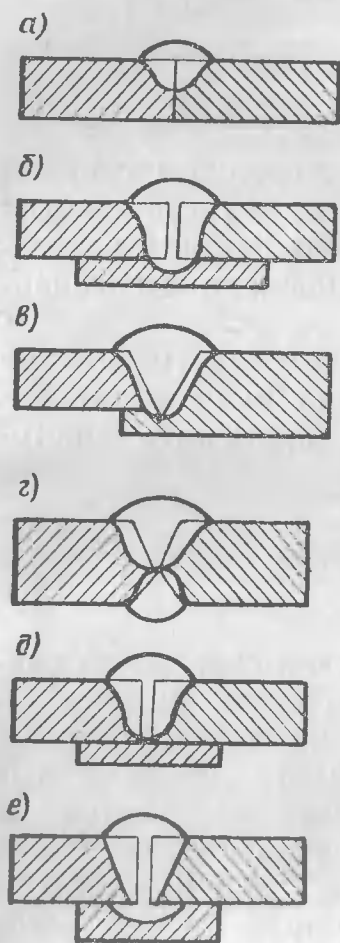


Рис. 109. Способы односторонней автоматической сварки

только при плотном равномерном поджатии подкладки по всей длине стыка, зазор в котором не превышает 0,5 мм. Медная подкладка к свариваемым крокам может прижиматься при помощи механических и пневматических прижимов. При сварке на медной подкладке шов с обратной стороны стыка получается заподлицо со свариваемыми листами.

Флюсо-медные подкладки отличаются тем, что в подкладке делается желобок для формирования обратного

труб и др. Разновидностью сварки на остающейся подкладке является *сварка в замок* (рис. 109, в), часто применяемая при выполнении кольцевых швов толстостенных цилиндров малого диаметра.

Сварка по предварительной ручной подварке (рис. 109, г) применяется в тех случаях, когда не представляется возможным кантовать изделие или когда автоматическая подварка невозможна (например, при варке кольцевых швов на цилиндрических изделиях относительно малого диаметра). При сборке таких соединений требования к зазору такие же, как для ручной сварки.

При толщине свариваемых деталей до 6 мм включительно ручная подварка выполняется без скоса кромок. При толщине деталей свыше 6 мм (для ручной подварки) выполняется скос кромок под углом 60° на глубину 1/3 толщины свариваемого металла, но не более 6—8 мм.

Сварка на медной подкладке (рис. 109, д) применяется преимущественно при соединении тонких листов; шов хорошо формируется

валика стыкового шва (рис. 109, е). В этом случае стык собирается с зазором 2—3 мм, через который флюс заполняет желобок. Расплавляясь, флюс создает шлаковую прослойку между металлом шва и медной подкладкой и формирует обратный валик. Изменяя размеры желобка, можно регулировать размеры обратного валика. Разновидностью сварки на неподвижной флюсо-медной подкладке является сварка на скользящем медном башмаке.

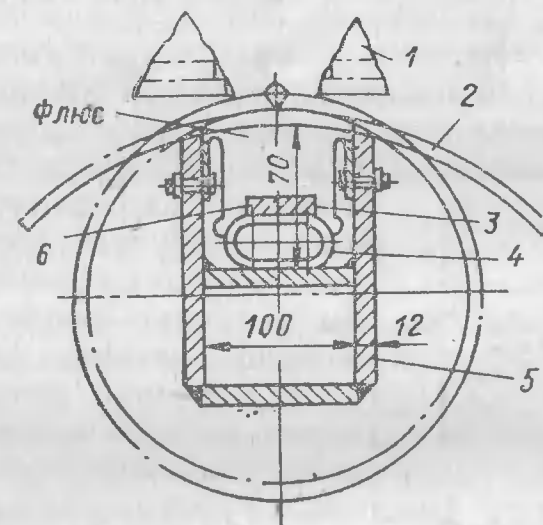


Рис. 110. Устройство флюсовой подушки:

1 — прижим; 2 — свариваемая деталь; 3 — мешок; 4 — шланг; 5 — корытообразная балка; 6 — груз

Сварка на флюсовой подушке производится с полным проваром всей толщины листа. Флюс предотвращает вытекание жидкого металла и шлака и обеспечивает формирование только в том случае, если флюс равномерно поджимается к свариваемым крокам. Схема устройства такой подушки показана на рис. 110.

Поджатие флюса обычно осуществляется с помощью дюритового шланга, в который подают сжатый воздух от цеховой воздушной сети. Воздух заполняет шланг, в результате чего шланг округляется и непосредственно или через толкатель плотно прижимает флюс к свариваемым крокам. При слабом поджатии флюса шов получается вогнутый с выпуклым обратным валиком. Сильное поджатие флюса приводит к обратному явлению, шов получается выпуклым, а обратная сторона шва имеет вогну-

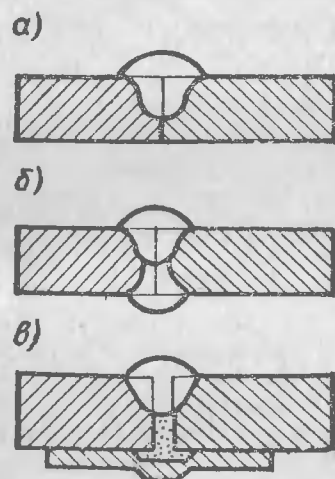
тость, равнозначную непровару. При чрезмерном поджатии флюса в шве образуются сквозные отверстия или канавка с обратной стороны.

Давление флюсовой подушки выбирают опытным путем в зависимости от толщины свариваемых деталей и режима сварки.

Неподвижность листов при сборке и сварке часто достигается при помощи электромагнитов, размещенных по всей длине электромагнитного стенда.

Двусторонняя автоматическая сварка

Двусторонняя автоматическая сварка (сварка по автоматической подварке) является основным методом получения высококачественных швов. В этом случае



стыковое соединение сначала проваривается автоматом с одной стороны на весу так, чтобы глубина проплавления составляла половину или несколько более половины толщины металла (рис. 111, а). После кантовки изделия сварку второго прохода шва производят с таким расчетом, чтобы был проплавлен корень шва (рис. 111, б).

Однако в ряде случаев при сварке первого прохода шва на весу возникают затруднения со сборкой под сварку, так как для того чтобы при сварке жидкий металл и шлак не вытекали в зазор, необходимо, чтобы зазор его не превышал 1 мм, что в некоторых случаях бывает трудно обеспечить. Поэтому, если между кромками повышенный зазор, то при первом проходе необходимо применять та-

Рис. 111. Выполнение стыкового шва двусторонней автоматической сваркой: а — сварка первого шва на весу; б — сварка второго шва с перекрытием первого шва 3—4 мм; в — сварка первого шва на флюсобумажной подкладке

кие же средства для подформовки обратной стороны шва, что и при односторонней автоматической сварке. В отдельных случаях можно производить сварку на флюсо-бумажных подкладках. Флюсо-бумажные подкладки изготавливаются следующим образом: на ленту плотной бумаги наносится кисточкой слой жидкого стекла и насыпается флюс; при этом часть флюса приклеивается, а остальной

флюс сыпается. Количество флюса, которое приклеивается к бумаге, достаточно, и бумага с приклеенным флюсом просушивается. Перед сваркой в местах повышенных зазоров флюсо-бумажная подкладка приклеивается жидким стеклом (рис. 111, в) и в зазор засыпается мелкий флюс, который, удерживаясь подкладкой, препятствует вытеканию жидкого металла из ванны.

Под действием теплоты, выделяющейся при сварке, бумага сгорает, но это происходит в тот момент, когда металл шва над бумажной прокладкой уже успел затвердеть. Второй шов выполняется обычным порядком после кантовки изделия.

Двусторонняя автоматическая сварка по заданному зазору основана на том, что при заданном режиме сварки общая высота сварного шва H , состоящая из глубины провара h и высоты выпуклости q , не зависит от формы и глубины разделки (см. рис. 108). Это значительно упрощает подготовку деталей и сборку под сварку. При этом способе сварки за счет создания зазора между кромками уменьшается выпуклость шва и соответственно увеличивается глубина провара.

Сварка первого шва по зазору выполняется на флюсовой подушке. Перед сваркой в зазор засыпается флюс мелкой грануляции, а замыкание электрода осуществляется на одной из технологических планок, прихваченных к торцам состыкованных деталей. После зажигания дуги электрод вводится в центр зазора. Режимы бескосной двусторонней автоматической сварки с заданным зазором на постоянном токе обратной полярности приведены в табл. 32.

Часто применяется многопроходная автоматическая сварка, так как односторонняя нижняя автоматическая сварка металла толщиной более 20 мм сопряжена с определенными трудностями, возникающими в связи с неблагоприятными условиями кристаллизации металла шва. Это является причиной недопустимого снижения его ударной вязкости. В некоторых случаях при односторонней сварке большой толщины в шве могут возникнуть кристаллизационные трещины. Кроме того, для осуществления односторонней сварки металла большой толщины требуется сварочная дуга большой мощности, а предприятия не всегда располагают источниками питания дуги соответствующей мощности. Поэтому, как правило, металл толщиной свыше 20 мм сваривают за несколько проходов.

Таблица 32. Режимы двусторонней автоматической сварки с заданным зазором (флюс АН-348А, диаметр электрода 5 мм)

Толщина материала	Зазор между кромками	Сила сварочного тока, А	Напряжение дуги, В	Скорость перемещения дуги, м/ч
мм				
14 16	3—4	700—750	32—34	30
18 20	4—5	750—800 850—900	34—36	27
24 28	5—6	900—950	36—38	25 20
30 40 50	6—7 8—9 10—11	950—1000 1100—1200 1200—1300	38—40 40—44 44—48	16 11,5 9,5

Примечание. При сварке на переменном токе напряжение на дуге следует увеличить на 2—4 В.

В соединениях для многопроходной сварки подготовка кромок выполняется согласно требованиям ГОСТов с учетом условий выполнения шва.

Особенно тщательно должен выполняться первый слой-проход, обеспечивающий провар корня шва в соединениях с Х-образной подготовкой кромок. В связи с тем, что толстолистовая сталь при прокатке из слитка претерпевает меньшую степень обжатия, ликвирующие примеси (как, например, сера, углерод) концентрируются в средней части листа, вызывая опасность возникновения горячих трещин при сварке первого слоя. Поэтому сварка первого слоя шва должна производиться при малом проплавлении основного металла. Первые два-три слоя выполняются односторонними при положении электрода по оси симметрии шва, последующие выполняются в несколько проходов со смещением электрода относительно центра шва.

Автоматическая сварка под флюсом угловых швов

Тавровые, угловые и нахлесточные соединения сваривают угловыми швами. Угловые швы можно сваривать следующими двумя способами: 1) в «лодочку» верти-

кальным электродом; 2) в нижнем положении наклонным электродом.

Сварка вертикальным электродом в «лодочку» (рис. 112) требует кантовки изделия и может производиться при симметричном (а) и несимметричном (б) расположении свариваемых листов. Основной трудностью сварки угловых швов в лодочку является то, что жидкий металл легко протекает в зазоры. Поэтому к сборке под сварку предъявляются более жесткие требования. Если

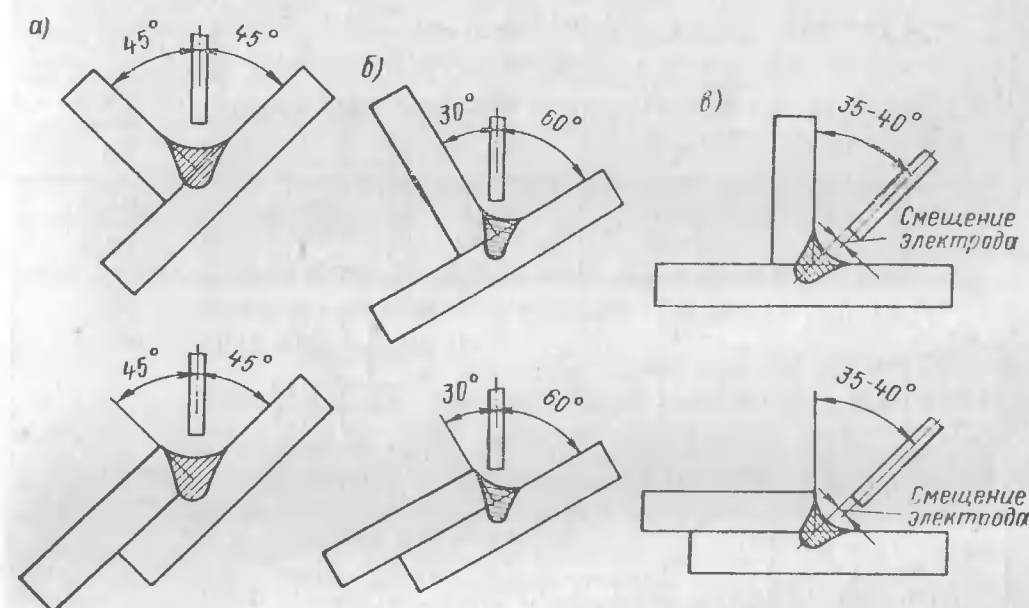


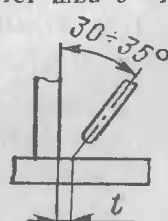
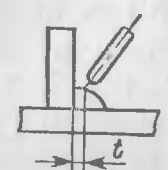
Рис. 112. Схема сварки угловых швов

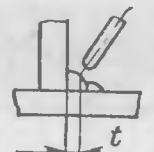
зазор более 1—1,5 мм, то необходимо применять меры, предупреждающие протекание жидкого металла (в основном такие же, как и при сварке стыковых соединений с зазором).

Наилучшее формирование шва обеспечивается при сварке в симметричную лодочку. Наибольший провар стенки может быть достигнут сваркой в несимметричную лодочку с углом $\alpha = 30^\circ$ (рис. 112, б).

Сварка наклонным электродом угловых швов (рис. 112, в) производится в том случае, когда по условиям производства, по габаритам свариваемого изделия не представляется возможным установить его в положение лодочки. В этом случае основным условием получения качественного шва является не только правильный выбор режима сварки, но и точное расположение конца электрода относительно кромок свариваемого изделия

Таблица 33. Последовательность выполнения многопроходных угловых швов

Катет шва 9—14 мм				
				
I проход		II проход		
Номер прохода	Смещение оси электрода t , мм			
	Диаметр электродной проволоки $d_{эл}$, мм			
	2	3	4	5
I	5—7	4—6	4—6	4—6
II	4—6	3—5	1—3	1—3

Катет шва 14—16 мм				
				
I проход		II проход		III проход
Номер прохода	Смещение оси электрода t , мм			
	Диаметр электродной проволоки $d_{эл}$, мм			
	2	3	4	5
I	$0,5d_{эл}$			
II	В кромку I прохода на полке			
III	5—7	3—5	1—3	1—3

Катет шва 16—18 мм					
					
I проход		II проход		III проход	IV проход
Номер прохода	Смещение оси электрода t , мм				
	Диаметр электродной проволоки $d_{эл}$, мм				
	2	3	4	5	
I	$0,5d_{эл}$				
II	В кромку I прохода на полке				
III	2—3		3—4		
IV	1—2		2—3		

при его перемещении. Электрод надо располагать так, чтобы угол, образуемый электродом и вертикальной стенкой, составлял $35—40^\circ$, а сам электрод был бы несколько смещен в сторону от вертикальной стенки так, чтобы верхняя образующая электрода совпадала с линией наклона, проходящей через вершину угла.

При расположении электрода по биссектрисе угла в вертикальной стенке у шва могут образоваться подрезы. Если смещение будет больше указанного, то вероятны наплывы на горизонтальном листе.

При сварке угловых швов наклонным электродом за один проход можно получить швы катетом до 8 мм. Швы с большим катетом выполняют в несколько проходов, как это указано в табл. 33. Наилучшее формирование угловых швов достигается при сварке электродной проволокой диаметром 2 мм.

§ 34. РАСЧЕТ РЕЖИМОВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ И ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ

Основными параметрами режима автоматической сварки стали под флюсом являются сила сварочного тока, напряжение на дуге, скорость перемещения дуги, диаметр и скорость подачи сварочной проволоки.

Расчет режима сварки производится всегда для конкретных случаев, когда известен тип соединения, марка стали, флюса и другие данные по шву и технологическому процессу. Поэтому до начала расчета по чертежу, рекомендациям ГОСТов или ТУ, следует установить вид соединения, форму и размеры и изобразить их на миллиметровой бумаге в натуральную величину или в масштабе с сохранением оптимальных размеров по глубине провара ширины шва, высоте выпуклости, площади сечения наплавленного металла однопроходного шва или отдельных проходов и общую площадь многопроходного шва. При этом необходимо учитывать, что максимальное сечение однопроходного автоматного шва обычно не должно превышать 100 мм^2 .

Расчет режимов сварки стыковых швов

Глубина провара при стыковой сварке находится в прямой зависимости от сварочного тока и это может быть выражено уравнением

$$h = kI_{св}, \quad (115)$$

Таблица 34. Зависимость коэффициента пропорциональности k от некоторых параметров режима

Марка флюса	Род тока	Диаметр электрода, мм	Коэффициент k , мм/100 А	
			Наплавка и стык без разделки	Тавр, стык с разделкой кромок
АН-348А	Переменный	5	1,1	1,5
		2	1,0	2,0
	Постоянный обратной полярности	5	1,1	1,75
	Постоянный прямой полярности	5	1,0	1,25
ОСЦ-45	Переменный	5	1,15	1,55

где k — коэффициент пропорциональности (мм/100 А), зависящий от рода тока и полярности, диаметра электрода, а также марки флюса; колеблется в пределах от 1,0 до 2,0 (табл. 34).

Глубина провара (см) может быть определена по формуле

$$h = 0,0076 \sqrt{\frac{Q_{\text{эф}}}{v \psi_{\text{пр}}}}, \quad (116)$$

где $Q_{\text{эф}}/v$ — погонная энергия; $\psi_{\text{пр}}$ — коэффициент формы провара.

Сварочный ток, необходимый для получения заданной глубины проплавления основного металла, рассчитывают по формуле $I_{\text{св}} = h/k$.

Диаметр сварочной проволоки

$$d = 2 \sqrt{\frac{I_{\text{св}}}{i \pi}}, \quad (117)$$

где i — плотность тока, приближенные значения которой приведены ниже:

Диаметр электрода, мм	5	4	3	2	1
Допустимая плотность тока, А/мм ²	30—50	35—60	45—90	65—200	90—400

Напряжение на дуге принимаем для стыковых соединений в пределах 32—40 В, для угловых — 28—36 В. Большему току и диаметру электрода соответствует большее напряжение на дуге.

Зная сварочный ток и напряжение на дуге, определяем коэффициент формы провара по графикам его за-

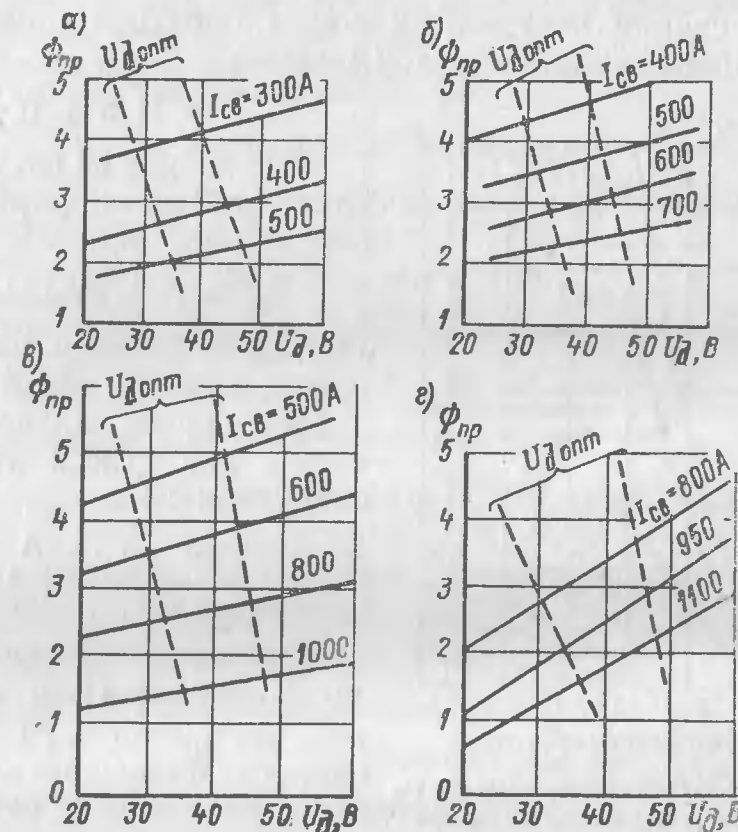


Рис. 113. Значение $\psi_{\text{пр}}$ в зависимости от силы сварочного тока и напряжения на дуге: а — при $d_{\text{эл}} = 2$ мм; б — при $d_{\text{эл}} = 4$ мм; в — при $d_{\text{эл}} = 5$ мм; г — при $d_{\text{эл}} = 6$ мм

висимости от сварочного тока и напряжения на дуге для сварки на переменном токе под флюсом ОСЦ-45 (рис. 113).

Зная глубину провара и коэффициент формы провара, определяем ширину шва:

$$e = \psi_{\text{пр}} h. \quad (118)$$

Задавшись оптимальным значением формы выпуклости, находим высоту выпуклости:

$$\psi_{\text{в}} = e/q, \quad (119)$$

$$q = e/\psi_{\text{в}}.$$

Определяем площадь сечения наплавленного металла F_n , в зависимости от формы сечения наплавленного металла по формуле (105).

Скорость перемещения дуги (м/ч)

$$v_{п. д} = \alpha_n I_{св} / (F_n \gamma 100).$$

При сварке постоянным током обратной полярности коэффициент наплавки (г/(А·ч))

$$\Delta \alpha_{н, з} / (А \cdot ч)$$

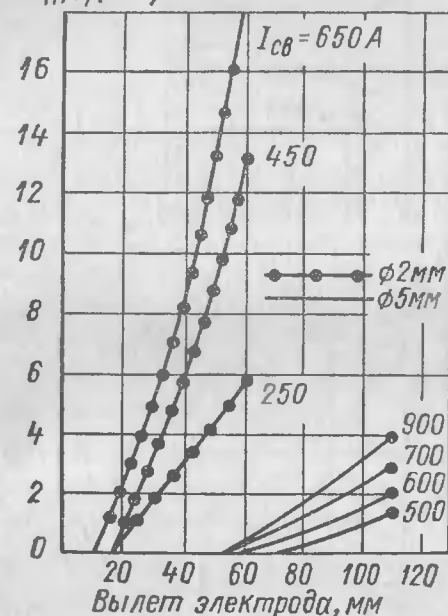


Рис. 114. Зависимость $\Delta \alpha_n$ от силы сварочного тока, диаметра и вылета электрода

током. Действительный коэффициент наплавки при данном вылете можно определить по формуле

$$\alpha_{н. д} = \alpha_n + \Delta \alpha_n, \quad (122)$$

где $\Delta \alpha_n$ — увеличение коэффициента наплавки за счет предварительного нагрева вылета электрода; определяется по рис. 114.

Скорость подачи сварочной проволоки определяем по формуле

$$v_{п. пр} = \frac{M_n}{m_n} = \frac{\alpha_n I_{св}}{\pi d^2 \gamma / 4} = \frac{4 \alpha_n I_{св}}{\pi d^2 \gamma}, \quad (123)$$

где M_n — масса наплавленного металла за 1 ч/г; m_n — масса 1 м проволоки, г.

Пример. Рассчитать режим автоматической наплавки валика на пластину $s = 14$ мм с глубиной провара 9 мм; флюс ОСЦ-45.

1. Определим сварочный ток из уравнения (115)

$$I_{св} = \frac{h}{k} 100 = \frac{9 \cdot 100}{1,15} \approx 800 \text{ А};$$

k выбираем по табл. 34; для диаметра 5 мм $k = 1,15$.

2. Зная, что напряжение на дуге меняется в пределах 32—40 В, принимаем $U_d = 36$ В.

3. Определяем коэффициент формы провара по рис. 113 $\psi_{пр} = 2,7$.

4. Зная $\psi_{пр}$, определяем ширину шва

$$e = \psi_{пр} h = 2,7 \cdot 9 = 24,3 \text{ мм}.$$

5. Зная, что коэффициент формы валика $\psi_v = e/q = (5 \div 8)$, находим выпуклость q ; принимаем $\psi_v = 8$, тогда

$$q = e/\psi_v = 24/8 = 3 \text{ мм}.$$

6. Определяем площадь сечения наплавленного металла

$$F_n = 0,75 e q = 0,75 \cdot 24,3 = 54 \text{ мм}^2 = 0,54 \text{ см}^2.$$

7. Определяем коэффициент наплавки α_n по уравнению (121):

$$\alpha_n = A + B \frac{I_{св}}{d_{эл}} = 7 + 0,04 \frac{800}{5} = 13,4 \text{ г/(А·ч)}.$$

8. Действительный коэффициент наплавки $\alpha_{н. д}$ находим из уравнения (122)

$$\alpha_{н. д} = \alpha_n + \Delta \alpha_n,$$

$\Delta \alpha_n$ находим по графику, приведенному на рис. 114, тогда

$$\alpha_{н. д} = 13,4 + 0,5 = 13,9 \text{ г/(А·ч)}.$$

9. Определим скорость перемещения дуги

$$v_{п. д} = \frac{\alpha_n I_{св}}{F_n \gamma 100} = \frac{13,9 \cdot 800}{0,54 \cdot 7,8 \cdot 100} = 26,4 \text{ м/ч}.$$

10. Находим скорость подачи сварочной проволоки:

$$v_{п. пр} = \frac{4 \alpha_n I_{св}}{\pi d^2 \gamma} = \frac{4 \cdot 13,9 \cdot 800}{3,14 \cdot 2,5 \cdot 7,8} = 72 \text{ м/ч}.$$

Часто для сокращения времени по определению режимов автоматической сварки пользуются различными номограммами, в которых отображается зависимость между размерами швов и основными величинами режима сварки. На рис. 115 приведена номограмма, пользуясь которой можно определить режим двусторонней автоматической сварки бескосых швов стыковых соединений металла толщиной до 14 мм и односторонних швов с проваром до 9 мм при подформовке обратной стороны шва.

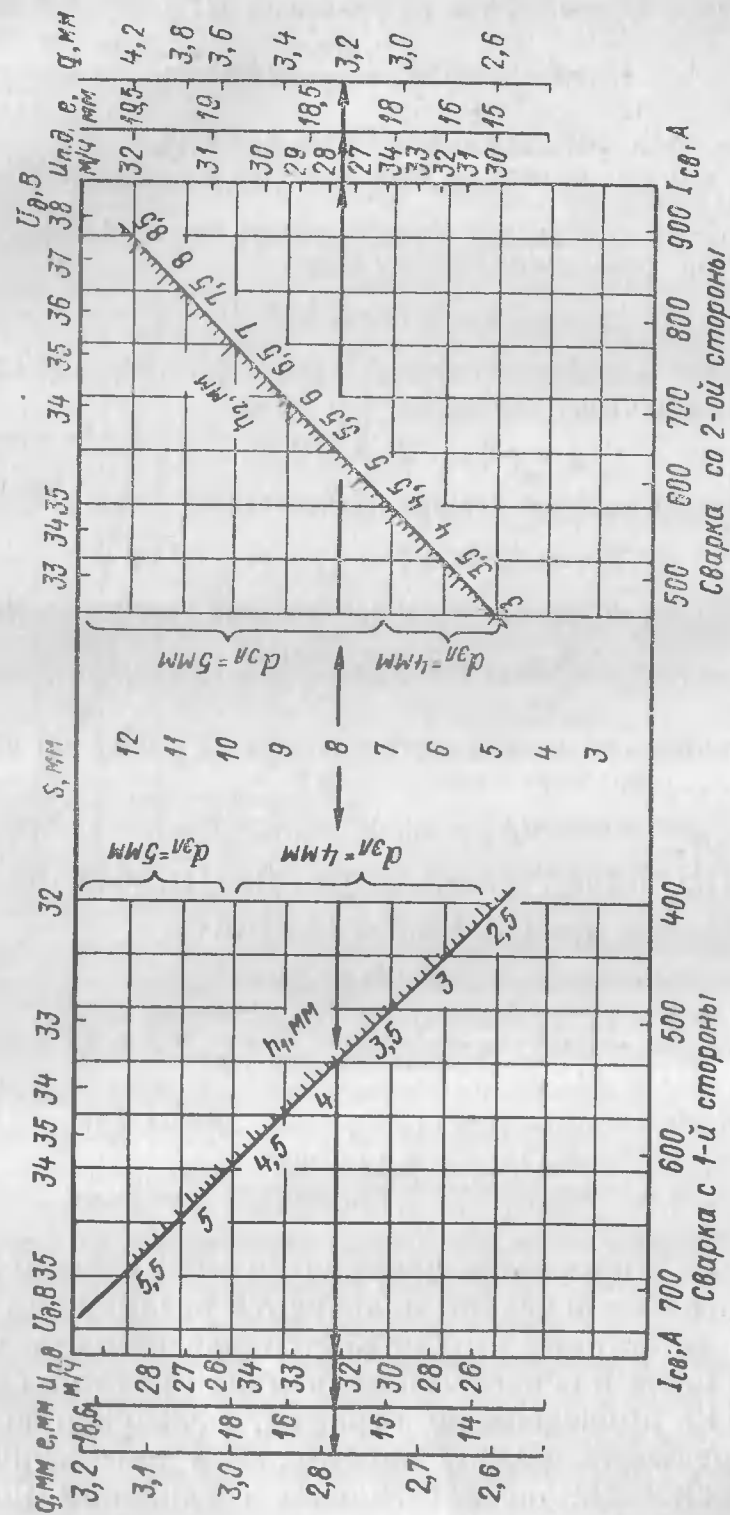
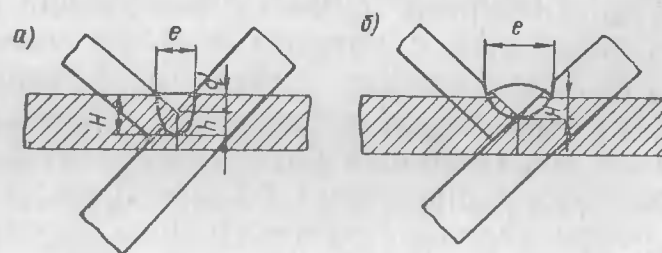


Рис. 115. Номограмма для определения режимов двухсторонней автоматической сварки стыковых соединений (ток переменный, флюс ОЦЛ-45)

Рекомендуется следующий порядок определения режима сварки двусторонних швов по номограмме. Допустим, требуется определить режим сварки стыкового шва на листах толщиной 8 мм. Тогда на вертикальной линии толщины металла s находим цифру 8, затем из этой точки на вертикаль мысленно проводим горизонтальную линию до пересечения с наклонной линией глубины провара h_1 . Из точки пересечения этих линий проводим линию вниз, вверх и влево или вправо в зависимости от того, для какой стороны шва (первой или второй) определяется режим

Рис. 116. Форма углового шва сваренного в «лодочку»: а — при оптимальном $\psi_{пр} = e/H \leq 2$; б — при $\psi_{пр} > 2$



сварки. Так, режим сварки для толщины 8 мм, обозначенный на номограмме стрелками, будет: для первой стороны шва $I_{св} = 530$ А, $U_d = 34$ В, $v_{п.д} = 32$ м/ч, $d_{эл} = 4$ мм (размеры шва: провар $h_1 = 3,8$ мм, ширина $e = 15,5$ мм, высота выпуклости $q = 2,8$ мм); для второй стороны шва $I_{св} = 650$ А, $U_d = 34$ В; $v_{п.д} = 27,5$ м/ч, $d_{эл} = 5$ мм (размеры шва: $h_2 = 5,5$ мм, $e = 18,3$ мм, $q = 3,2$ мм).

Определение режима по номограмме для односторонних швов по провару пояснений не требует.

При выборе режима сварки угловых швов необходимо учитывать некоторые особенности в их формировании по сравнению со стыковыми швами, а именно: ширина шва не должна быть больше ширины разделки (рис. 116, а). При ширине шва больше ширины разделки неизбежно появление подрезов (рис. 116, б); коэффициент формы провара в данном случае, принимаемый как отношение ширины шва к общей высоте шва $H = (\psi_{пр} = e/H)$, не должен быть больше 2, иначе, как ранее указывалось, получатся подрезы, но в то же время он не должен быть чрезмерно мал, так как в этом случае швы получаются слишком глубокие и узкие, склонные к образованию кристаллизационных трещин.

Практикой установлено, что угловые швы удовлетворительно формируются на режимах, при которых плотность тока в электроде принимается в пределах средних

значений, указанных на 244 с. С учетом указанного расчет режима ведется в следующей последовательности.

1. Зная катет шва (указывается в чертеже конструктором), определяем площадь поперечного сечения для шва без выпуклости

$$F_n = k^2/2;$$

с выпуклостью

$$F_n = k^2/2 + 1,05kq.$$

2. Выбираем диаметр электрода, имея в виду, что угловые швы с катетом 3—4 мм можно получить лишь при использовании электродной проволоки диаметром 2 мм; при сварке электродной проволокой диаметром 4—5 мм минимальный катет составляет 5—6 мм. Сварочную проволоку диаметром больше 5 мм, не обеспечивающую провар вершины углового шва, применять не следует.

3. Для принятого диаметра электрода (см. 244 с.) подбираем плотность тока на электроде и определяем сварочный ток

$$I_{св} = \pi d^2 i / 4.$$

4. Определяем действительный коэффициент наплавки в зависимости от рода и полярности тока по формулам (120)—(122).

5. Зная площадь сечения наплавленного за один проход металла, сварочный ток и коэффициент наплавки, определяем скорость перемещения дуги

$$v_{н.д} = \alpha_n I_{св} / (F \gamma 100).$$

6. По диаметру электрода, силе сварочного тока и напряжению на дуге (см. рис. 113), принятому ближе к нижнему пределу оптимальных значений напряжений, находим коэффициент формы провара.

7. Зная силу сварочного тока, напряжение на дуге и коэффициент формы провара, определяем глубину провара при наплавке на данном режиме

$$h = 0,076 \sqrt{Q_{эф} / (v \psi_{пр})}.$$

8. По глубине провара и коэффициенту формы шва определяем ширину шва

$$e = \psi_{пр} h.$$

9. Определяем высоту выпуклости

$$q = (1,35 \div 1,40) F_n / e.$$

10. Определяем общую высоту шва

$$H = h + q.$$

11. Определяем высоту наплавленного металла в разделку ($\alpha = 90^\circ$)

$$h_n = \sqrt{F_n}.$$

12. Определяем глубину проплавления основного металла

$$h_o = H - h_n. \quad (124)$$

Режимы сварки угловых швов могут быть также определены по таблицам и номограммам.

На рис. 117 приведена номограмма для определения режима сварки наклонным электродом диаметром 2 мм на постоянном токе обратной полярности, а на рис. 118 — диаметром 5 мм, на переменном токе.

В номограммах приняты следующие обозначения: K_v — видимый катет; K_p — расчетный катет; g — глубина проплавления вертикальной стенки; h_o — действительное опасное сечение (расчетный параметр); q — высота выпуклости; $I_{св}$ — сила сварочного тока; U_d — рекомендуемое напряжение на дуге; $v_{н.д}$ — скорость перемещения дуги. Штриховыми линиями очерчены области удовлетворительного формирования шва.

Как видно из приведенных номограмм, угловые швы с заданным катетом можно получить при разных режимах, однако при этом будут изменяться другие размеры шва и его форма, и можно получить выпуклые, плоские и вогнутые швы. При сварке на большом токе и относительно малых скоростях получаются выпуклые швы, а при сварке на сравнительно невысоких токах и больших скоростях получаются вогнутые швы.

На номограммах режимы, дающие разные швы по форме и сечению, отделены наклонными тонкими линиями. Наклонные кривые линии, имеющие сверху обозначения $K_p = 3$, $K_p = 4$; до $K_p = 8$, проведены через точки режимов сварки, обеспечивающих получение швов с одинаковыми расчетными катетами K_p .

Режимы, обеспечивающие получение швов с одинаковым видимым катетом K_v , нанесены на номограммы на-

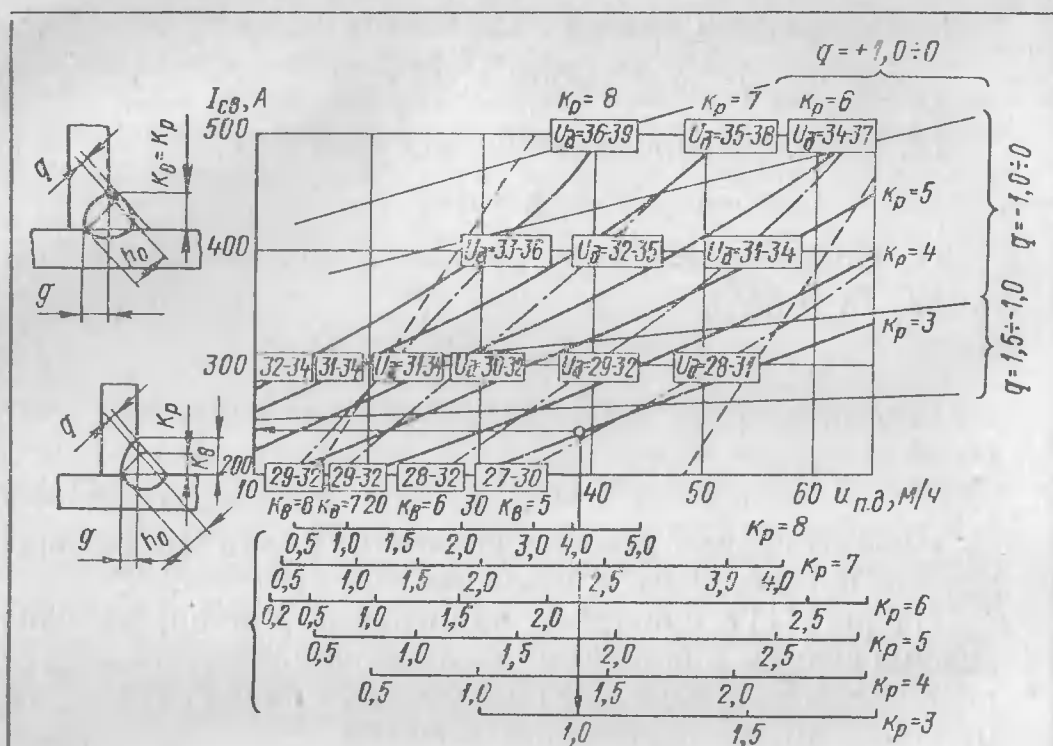


Рис. 117. Номограмма для определения режимов сварки угловых швов наклонным электродом ($d_{эл} = 2$ мм; ток постоянный обратной полярности)

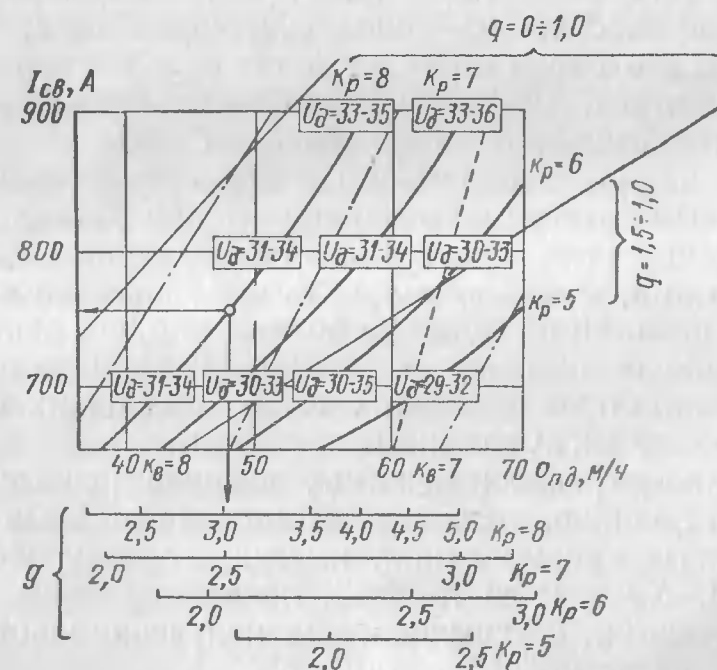


Рис. 118. Номограмма для определения режимов сварки угловых швов наклонным электродом ($d_{эл} = 5$ мм ток переменный)

клонными штрихпунктирными линиями, также обозначенными снизу соответствующими катетами. Напряжение на дуге обозначено в прямоугольниках на этих же наклонных линиях.

Таким образом, чтобы определить режим сварки, обеспечивающий необходимый катет шва, выбираем точку, лежащую на линии данного катета, в области, ограниченной штриховыми линиями, в зависимости от того, какой шов нам требуется получить: вогнутый, плоский или выпуклый, и из этой точки проводим линии на координатные оси графика. На ординате мы получим значение сварочного тока, на абсциссе — скорость перемещения дуги и др.

Пример. Необходимо выбрать режим сварки для получения вогнутого шва с расчетным катетом 8 мм. Сварка производится электродной проволокой диаметром 5 мм на переменном токе. Тогда на линии $K_p = 8$ мм (рис. 118) выбираем точку 0. Проекция из этой точки на оси ординат, в данном случае обозначенные перпендикулярными линиями со стрелками, определяет сварочный ток и скорость перемещения дуги. Напряжение на дуге берется в ближайшем прямоугольнике. Так, для заданных условий сварки режим будет: $I_{св} = 760$ А, $v_{п.д} = 48$ м/ч, $U_d = 31 \div 34$ В.

Полуавтоматическая сварка под флюсом (см. рис. 3) производится голый проволокой на полуавтоматах, основными элементами которых являются механизм подачи электродной проволоки, гибкий шланг, держатель с бункером для подачи флюса, аппаратура управления.

Полуавтоматическая сварка под флюсом обычно применяется для выполнения коротких, менее 1,5 м, криволинейных труднодоступных прерывистых швов.

В последние годы объем применения полуавтоматической сварки под флюсом значительно сократился и получает все большее применение полуавтоматическая сварка в углекислом газе — процесс более производительный и экономичный.

§ 35. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТРУДА ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКЕ ПОД ФЛЮСОМ

Производительность сварки в основном определяется массой наплавленного металла в единицу времени. При одnodуговой сварке вертикально расположенным электродом она зависит от режима сварки, преимущественно силы сварочного тока.

Так, при однодуговой сварке под флюсом проволокой диаметром 4—5 мм при силе сварочного тока 600—1300 А в большей степени реализуются преимущества автоматической сварки. Но при сварке на верхних пределах сварочного тока значительно возрастает коэффициент формы провара, что в ряде случаев может привести к образованию подрезов, горячих трещин, поэтому повышение производительности только за счет увеличения силы сварочного тока не всегда целесообразно.

Производительность можно увеличить за счет увеличения вылета электрода, в результате коэффициент на-

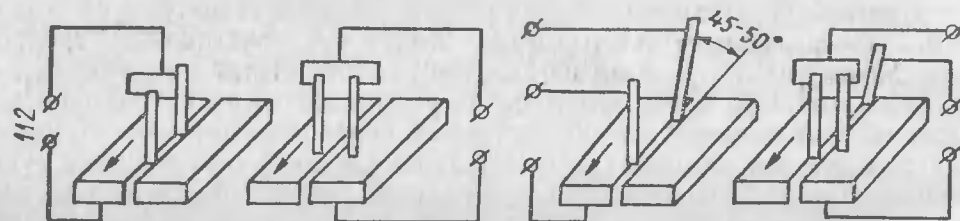


Рис. 119. Автоматическая сварка под флюсом несколькими проволоками

плавки возрастает на 40—50 %. Это также не всегда рационально, так как нарушается отношение между расплавленными основным и наплавленным металлом и возникают трудности в формировании металла шва.

Значительный эффект на производительность оказывает сварка двумя проволоками и более. При этом проволоки располагаются вертикально, наклонно или комбинированно по отношению к свариваемым кромкам и параллельно или последовательно друг к другу (рис. 119).

Если все проволоки подсоединены к одному полюсу источника питания, процесс называют многоэлектродным двухэлектродным; при подсоединении каждой из проволок к отдельному источнику питания — многодуговым двухэлектродным.

Для питания дуг применяют источники постоянного или переменного тока. Возможно питание по трехфазной схеме. Проволокам могут быть приданы колебания вдоль или поперек свариваемых кромок.

Сварку можно вести в общей ванне (рис. 120, а) или в отдельных ваннах, когда каждая дуга образует свою обособленную ванну (рис. 120, б). Последующая дуга в этом случае частично или полностью переплавляет слой,

сваренный предшествующей дугой. Возможна комбинация этих вариантов (рис. 120, в).

При сварке двумя и более проволоками за счет возрастания линейной скорости перемещения дуги увеличивается масса вводимого в сварочную ванну за единицу времени присадочного металла. При многослойной сварке обеспечивается существенное повышение ее производительности.

При сварке несколькими дугами в отдельные ванны за счет предварительного и сопутствующего подогрева и

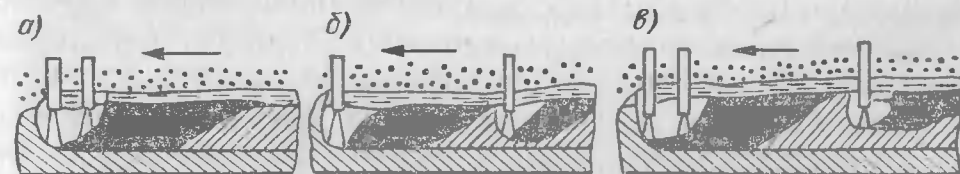


Рис. 120. Вид и форма сварочной ванны в зависимости от расположения электродов

возможности создания благоприятного для данных условий термического цикла достигается также повышение качества сварного соединения.

Применение проволок различного химического состава позволит в нужных пределах изменять состав металла шва.

Значительное повышение производительности автоматической сварки можно достичь введением в сварочную ванну дополнительного присадочного металла, не несущего электрического заряда и подаваемого в зону дуги дополнительно к основному присадочному металлу — плавящемуся электроду. Дополнительный присадочный материал может быть как сплошной — проволока, лента, так и сыпучий — порошок, рубленая проволока и др. Как видно из рис. 29, при автоматической сварке под флюсом эффективная тепловая мощность составляет 80 %, при этом основной металл поглощает 54 % теплоты, а на расплавление присадочного металла затрачивается только 28 %, флюса — 18 %.

Введением в сварочную ванну металлического порошка или крупки, приготовленной из сварочной проволоки диаметром 0,8—2,0 мм, достигается перераспределение баланса тепловой мощности и существенно уменьшается количество теплоты, поглощаемое основным металлом, его доля в металле шва уменьшается.

Количество теплоты на расплавление присадочного порошка или крупки увеличивается в 2,0—2,5 раза, за счет чего повышается производительность сварки соединений, получаемых в основном за счет наплавленного металла. Кроме того, меньше перегревается металл, повышается его стойкость против горячих и холодных трещин, а также имеется возможность регулировать химический состав наплавленного металла.

Введение присадочного материала непосредственно в плавильное пространство может производиться следующими способами: а) с помощью подводящих трубок; б) подачей на электродную проволоку, вместе с которой присадочный материал подается в сварочную ванну, причем удерживается он на движущейся проволоке электромагнитными силами, возникающими при прохождении сварочного тока через проволоку (см. рис. 5). Для прочного удержания присадочного материала на движущемся электроде достаточно магнитного поля, создаваемого силой тока более 100 А.

Подходя к плавильному пространству, присадочный материал нагревается до температуры, при которой теряются его магнитные свойства, силы притяжения к электроду ослабевают, присадочный металл отделяется от электрода и под воздействием шлаковой и металлической ванны поступает в хвостовую часть сварочной ванны, где расплавляется за счет избыточной теплоты ванны.

Стабильность процесса сварки зависит от массы и равномерности подачи присадочного материала. Это обеспечивается специальным устройством-дозатором, представляющим собой приставку к существующим сварочным автоматам для сварки плавящимся электродом.

§ 36. ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ СВАРКА, ЕЕ ОСОБЕННОСТИ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Принципиальная схема электрошлаковой сварки (см. рис. 6) и ее сущность изложены ранее. В настоящем параграфе рассмотрим особенности, технологию и другие данные, характеризующие процесс.

К особенностям электрошлаковой сварки следует отнести отсутствие дугового разряда, что обеспечивает спокойное протекание процесса без разбрызгивания металла и шлака и возможность производить сварку как од-

ним, так и несколькими, расположенными гребенкой, электродами. Для сваривания за один проход металла толщиной до 3 м производят возвратно-поступательное перемещение электродов. Подготовка кромок деталей для электрошлаковой сварки самая дешевая, так как обычно производится только их выравнивание газовой резкой.

Уменьшение расхода электродного металла происходит вследствие того, что площадь сечения швов при большой толщине с V-образной подготовкой кромок значительно больше площади сечения электрошлакового шва с прямоугольной подготовкой кромок. Расход флюса в 20—30 раз меньше, чем при обычной сварке под флюсом. Соответственно уменьшается количество теплоты, затрачиваемое на плавление его, увеличивается эффективная тепловая мощность (рис. 29, г) и производительность процесса. Коэффициент наплавки при сварке проволочными электродами достигает 25—35 г/(А·ч).

Вертикальное положение шва и постоянное наличие над поверхностью кристаллизующегося металла значительной массы двумя и тремя электродами приведены в табл. 35.

При электрошлаковой сварке электродом может служить не только тонкая проволока, но и электроды большого сечения в виде пластин стержней и др. (рис. 121, в). Пластинчатые электроды применяются главным образом при значительной толщине свариваемых деталей и сравнительно небольшой высоте швов жидкого металла и перегретого шлака, облегчают удаление легкоплавких вредных примесей, шлака и газов из металла шва, замедляют скорость охлаждения, уменьшают вероятность образования пор и при сварке закаливающихся сталей заметно уменьшают опасность появления околошовных холодных трещин.

Электрошлаковая сварка также часто применяется и для сварки небольших толщин, как, например, монтаж-

Т а б л и ц а 35. Толщина свариваемых деталей при электрошлаковой сварке в зависимости от числа проволочных электродов

Число элек- тродов	Толщина свариваемых деталей, мм	
	без колеба- ний элек- трода	с колеба- ниями элек- трода
1	От 20 до 50	От 50 до 150
2	От 50 до 100	От 100 до 300
3	От 100 до 150	От 150 до 450

ных стыков корпусов судов на стапеле при толщине деталей 14—30 мм.

Электрошлаковая сварка может быть осуществлена по нескольким технологическим вариантам одним проволоочным электродом диаметром 2 или 3 мм без поперечных колебаний и постоянной скоростью подачи проволоки в шлаковую ванну. Этим методом можно сваривать металл толщиной до 50 мм. При сварке больших толщин одним электродом без поперечных колебаний по толщине шов по сечению формируется неудовлетворительно: в средней части свариваемого сечения проплавление значительно больше, чем у поверхности свариваемых деталей, и в результате могут образоваться горячие трещины и непровар кромок у поверхности. Для увеличения глубины провара у поверхности деталей и уменьшения его в средней части сечения при сварке одним электродом ему сообщают поперечное возвратно-поступательное движение с определенной скоростью (см. рис. 6). Тогда удовлетворительное формирование шва по сечению можно получить при толщине металла до 150 мм. В случае необходимости сваривать металл большей толщины применяют двух-, трех- и многоэлектродную сварку проволоочными электродами без поперечных или с поперечными их перемещениями.

На рис. 121, а изображена схема процесса электрошлаковой сварки тремя электродами, а на рис. 121, б — многоэлектродная шлаковая сварка. Металл толщиной до 1 мм можно сваривать одним пластинчатым электродом (рис. 121, в). Преимуществом этого способа по сравнению с электрошлаковой сваркой проволоочными электродами является упрощение техники сварки, сварочной аппаратуры и повышение производительности.

При электрошлаковой сварке пластинчатыми электродами они опускаются (по мере их оплавления) в шлаковую ванну, и шов образуется за счет расплавления основного металла и расплавленного металла пластин. Число пластин выбирается в зависимости от толщины свариваемого металла, предпочтение отдается сварке тремя электродами, когда имеется возможность подключиться ко всем фазам источника питания и тем самым обеспечить равномерную его загрузку.

Для сварки изделий сплошного криволинейного профиля с переменным сечением в зазор между свариваемыми кромками на всю длину сварного соединения неподвижно помещают стальную пластину с пазами или несколько

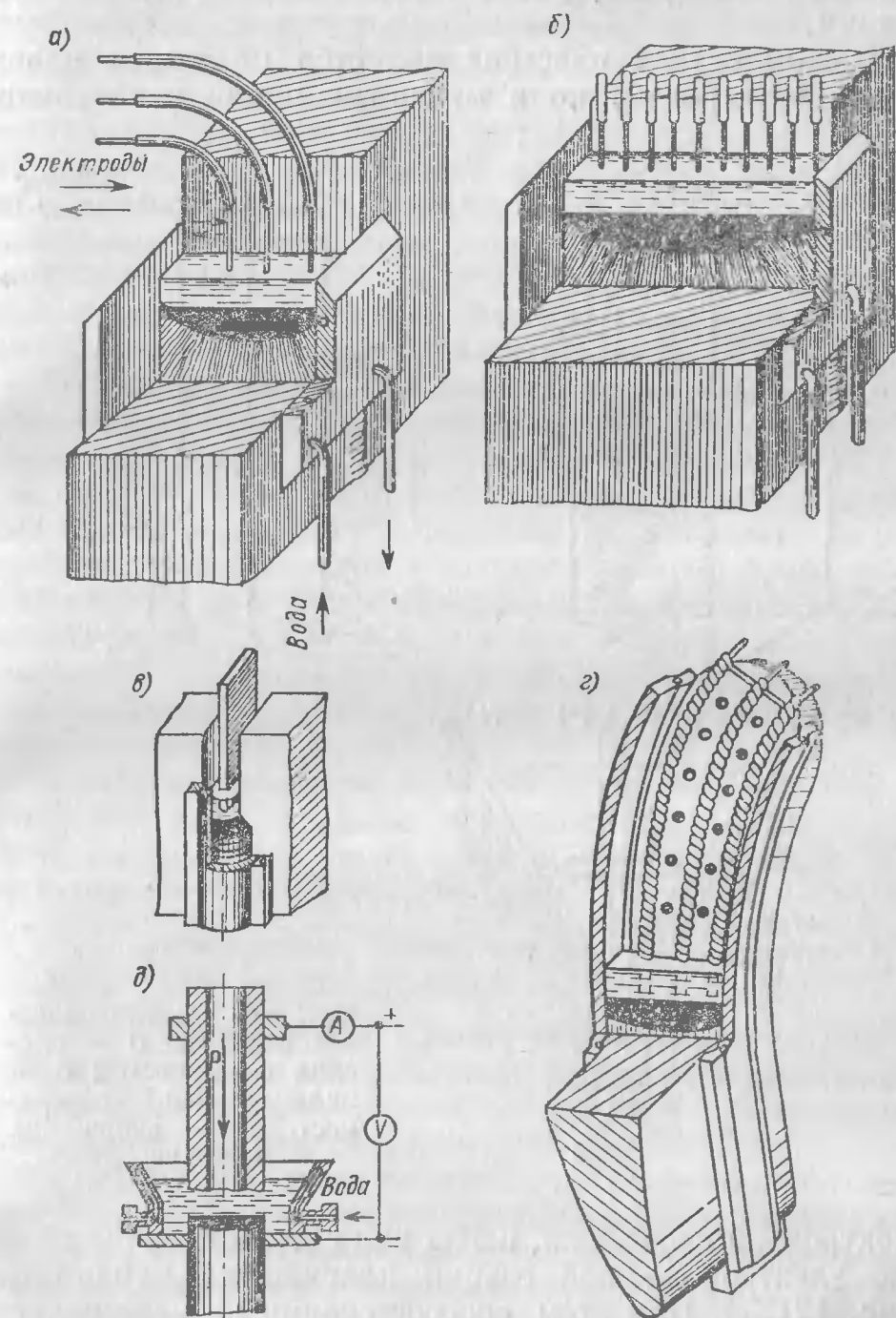


Рис. 121. Некоторые способы электрошлаковой сварки

пластин, которым придается форма продольного сечения свариваемых деталей с приваренными трубками или проволочными спиралями для пропуска электродной проволоки.

В этом случае пластина является не только плавящимся электродом, но и мундштуком для наплавления

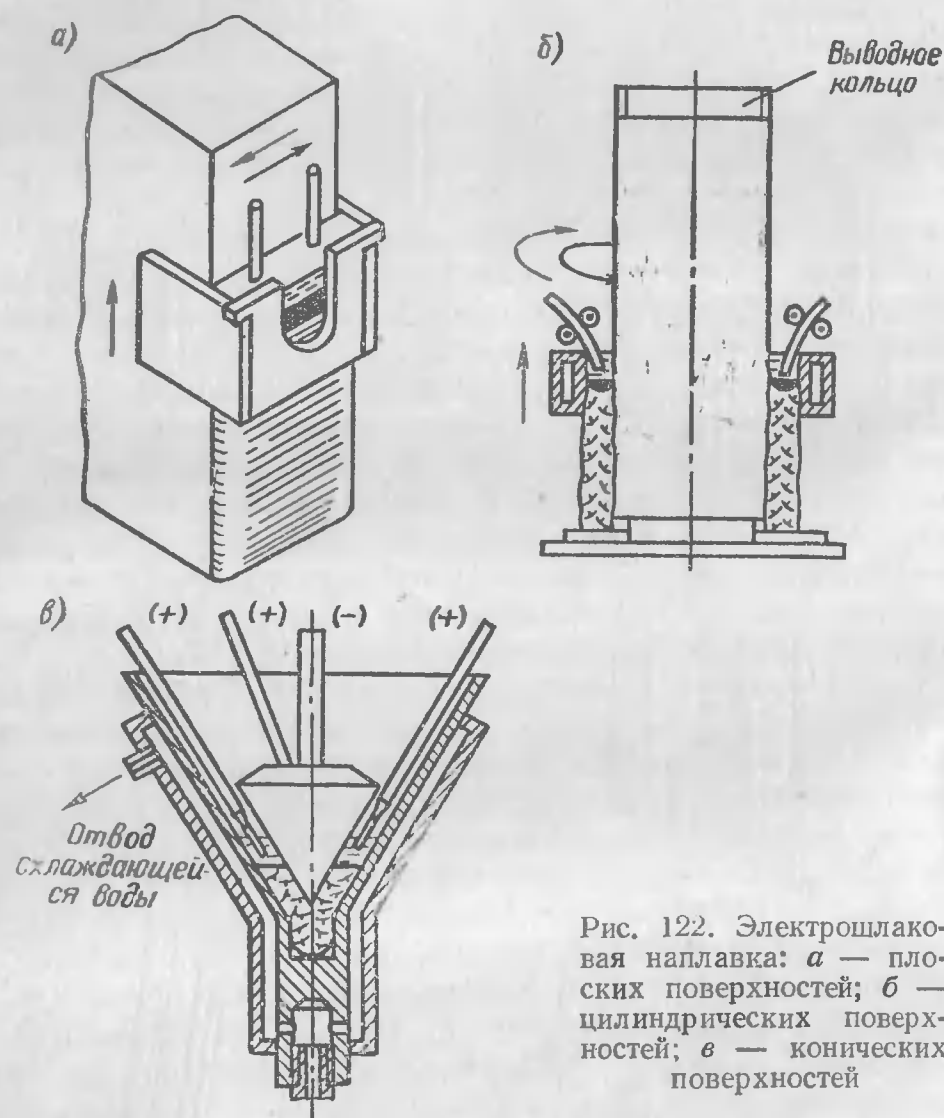


Рис. 122. Электрошлаковая наплавка: а — плоских поверхностей; б — цилиндрических поверхностей; в — конических поверхностей

электродной проволоки, и этот вид сварки получил название электрошлаковой сварки плавящимся мундштуком (рис. 121, г). При этом способе сварки по мере подъема шлаковой ванны вследствие заполнения зазора в стыке расплавленным металлом плавящийся мундштук оплавляется вместе с электродной проволокой и после затвердевания образует шов.

Контактно-шлаковая сварка применяется для соединения деталей, имеющих в сечении круглую, квадратную или сложную форму. Плотность сварочного тока подбирается примерно в пределах $0,3—0,5 \text{ А/мм}^2$. Контактно-шлаковая сварка названа так, потому, что ее схема (рис. 121, д) напоминает контактную сварку. При этом детали располагаются одна над другой с определенным зазором; на нижнюю деталь укрепляется специальный охлаждаемый медный кокиль. Для быстрого наведения электрошлакового процесса между торцами свариваемых деталей закладывается несколько кусочков электропроводного флюса; кроме того, в кокиль засыпается сварочный флюс и к деталям подводится ток.

При прохождении сварочного тока кусочки электропроводного флюса расплавляются, образуя небольшую сварочную ванну, которая постепенно увеличивается за счет расплавления сварочного флюса. После расплавления всей массы флюса, засыпанного в кокиль, за счет теплоты, выделяющейся в шлаковой ванне, нагреваются и оплавляются концы свариваемых деталей и образуется металлическая ванна. Когда объем ее достигнет нужных размеров, ток отключается, и верхний стержень быстро приближается к нижнему до соприкосновения — процесс сварки закончен.

Электрошлаковый процесс может быть также использован для наплавки плоских, цилиндрических и конических поверхностей, если толщина наплавленного слоя не менее $12—15 \text{ мм}$ (рис. 122).

Материалы, применяемые для электрошлаковой сварки

В дополнение к ранее рассмотренным основным требованиям к флюсам для автоматической сварки флюсы для электрошлаковой сварки должны еще удовлетворять следующим дополнительным требованиям:

1. Обеспечить быстрое наведение шлаковой ванны и устойчивое протекание электрошлакового процесса, для чего они должны иметь высокую электропроводность и высокую температуру кипения.

2. Обеспечить нормальное формирование шва без подрезов и наплывов.

3. Не отжимать ползуны и не вытекать в зазор между ползунами и свариваемой деталью при достижимой на практике точности сборки.

4. Давать легкоотделяющуюся от поверхности шва корку. Этим требованиям удовлетворяют флюсы марок АН-22, АН-8 и др. (см. табл. 15).

В связи с малой интенсивностью реакций взаимодействия между шлаком и металлом при электрошлаковой сварке не наблюдается легирования металла шва через расплавленный флюс.

При электрошлаковой сварке даже малоуглеродистых сталей, в связи с особыми условиями протекания металлургических процессов, для сохранения необходимых свойств металла шва он должен быть легирован. Последнее достигается применением электродной проволоки Св-08ГА или Св-10Г2 либо пластин из стали 09Г2.

В тех случаях, когда электрошлаковая сварка выполняется несколькими электродными проволоками или несколькими пластинами, состав наплавленного металла можно изменять, применяя электроды из разных марок стали. Это позволяет в значительных пределах регулировать состав металла шва.

Типы сварных соединений и подготовка под сварку

Электрошлаковой сваркой можно выполнять любой тип соединений. Прямые кромки после кислородной резки обычно устанавливают с зазором, в который вводятся мундштуки и подается электродная проволока или пластина. Данные о необходимом зазоре в зависимости от толщины соединяемых деталей следующие:

Толщина металла, мм	До 30	До 100	До 150	От 150 до 500	Свыше 500
Зазор в стыке, мм	16 ± 2	22 ± 2	25 ± 3	30 ± 3	35 ± 3

При сборке под сварку длинных деталей следует учитывать возможное укорочение при остывании выполненной части шва. В связи с этим сборочный зазор по длине шва должен быть разным: вначале он меньше и устанавливается равным зазору согласно рекомендациям, приведенным выше. В верхней части соединения при жестких деталях сборочный зазор с учетом скорости сварки увеличивается на 3—5 мм на 1 м длины стыка. Чем меньше скорость сварки, тем больше должен быть зазор.

Сборка деталей под электрошлаковую сварку обычно производится с помощью массивных скоб, привариваемых с обратной стороны свариваемых швов. Вырез в скобе

должен быть таким, чтобы в него прошла остающаяся подкладка, медная подкладка или ползун; при этом крепление первых двух обычно осуществляется клиньями, забиваемыми между скобами и подкладками.

Сборка под сварку пластинчатыми электродами производится с соблюдением тех же правил, и зазор в стыке устанавливается на 14—16 мм больше толщины пластинчатого электрода. Учитывая, что толщина пластин берется в пределах 8—20 мм, зазор в стыке обычно составляет 25—35 мм. Для облегчения возбуждения дуги в начале сварки к нижнему торцу пластинчатого электрода приваривается пластинка толщиной 3—5 мм, длиной около 100 мм и шириной, равной ширине электрода.

При подготовке соединения под сварку плавящимся мундштуком он должен располагаться в зазоре симметрично относительно свариваемых кромок и быть от них изолирован. На рис. 121, з показано сечение стыка, подготовленного под электрошлаковую сварку плавящимся мундштуком.

Материал, применяемый для фиксации мундштука и его изоляции от свариваемых кромок, должен отвечать определенным требованиям; температура его плавления должна быть близка к температуре плавления свариваемого металла; он не должен содержать вещества, которые после его расплавления, попадая в шлаковую ванну, могли бы загрязнить металл шва. Обычно применяют стеклоткань или стекло.

§ 37. РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ

Основными параметрами режима электрошлаковой сварки проволочными электродами являются следующие:

диаметр электродной проволоки — $d_{эл}$ (обычно принимается равным 3 мм, а в некоторых случаях 5 мм);

сила сварочного тока — $I_{св}$;

скорость подачи электрода — $v_{п.э}$;

напряжение на шлаковой ванне — $U_{шл}$;

скорость сварки — $v_{св}$;

толщина свариваемого металла — s ;

сухой вылет электрода — l_c ;

скорость поперечных перемещений электрода — $v_{п.п}$;

время выдержки у ползуна при сварке с поперечными колебаниями — t_b ;

недоход последующего электрода до предыдущего (недокрыш) при сварке несколькими электродами с поперечными колебаниями — l_n ;

число сварочных проволок-электродов — $n_{эл}$;

зазор — b ;

глубина шлаковой ванны — $h_{шл}$;

недоход электрода до ползуна;

марка флюса.

Все эти параметры существенно влияют на качество и формирование сварного шва и должны правильно подбираться. При выборе их обычно исходят из следующих двух условий:

1. Выбранный режим должен гарантировать сплошность сварного соединения — отсутствие внутренних и внешних несплавов и ширину провара кромок в пределах 6—10 мм на сторону.

2. При сварке на выбранном режиме с применением соответствующих сварочных материалов в шве не должны возникать горячие (кристаллизационные) трещины, для чего режим сварки должен обеспечить получение оптимального коэффициента формы сварочной ванны.

При электрошлаковой сварке форму и состав шва в основном определяет ширина шва. С изменением ширины шва меняются условия кристаллизации сварочной ванны, доля участия основного металла в шве, а следовательно, и химический состав шва и его свойства.

Рассмотрим влияние основных параметров режима электрошлаковой сварки на ширину шва.

При увеличении силы сварочного тока сначала несколько возрастает ширина провара, вследствие увеличения тепловой мощности. Дальнейшее увеличение тока вызывает уменьшение ширины провара, так как при этом возрастает глубина металлической ванны, и в шлаковой ванне выделяется меньше теплоты. Силу сварочного тока выбирают в зависимости от отношения толщины свариваемого металла к числу электродов

$$I_{св} = A + Bs/n_{эл}, \quad (125)$$

где A и B — коэффициенты ($A = 220 \div 280$; $B = 3,2 \div 4,0$).

При $n_{эл} = 1$

$$I_{св} = A + Bs. \quad (126)$$

Кроме того, установлено, что ток в сварочной цепи зависит от скорости подачи электродной проволоки и связан с ней линейной зависимостью

$$I_{св} = (1,6 \div 2,2) v_{п.э} \quad (127)$$

(коэффициенты зависят от марки проволоки и флюса), тогда

$$v_{п.э} = I_{св}/(1,6 \div 2,2). \quad (128)$$

Увеличение силы тока при увеличении скорости подачи может быть объяснено тем, что с увеличением скорости подачи уменьшается расстояние между концом погруженного в шлаковую ванну электрода и поверхностью металлической ванны. Высота слоя шлака между концом электрода и металлической ванной уменьшается и, как следствие, уменьшается его сопротивление. Это приводит к повышению силы тока; к дополнительному подогреву ванны и повышению температуры шлака. Увеличение температуры шлака также увеличивает скорость расплавления электрода и возрастает расстояние между концом электрода и металлической ванной. Это приводит к установлению нового стабильного состояния в процессе плавления электрода.

Как ранее отмечалось, повышение тока приводит к увеличению глубины металлической ванны и уменьшению ширины провара, в результате коэффициент формы металлической ванны снижается и вероятность образования горячих трещин возрастает. Поэтому сварочный ток ограничен необходимостью получения благоприятной формы сварочной ванны, при которой не возникает опасность появления горячих трещин.

Повышение напряжения на шлаковой ванне вызывает значительное увеличение ширины провара и рост коэффициента формы металлической ванны. Чрезмерное повышение напряжения на шлаковой ванне вызывает вскипание шлака, вследствие чего нарушается устойчивость процесса сварки.

Для получения металлической ванны оптимальной формы, при которой нет опасности образования горячих трещин, большему току должно соответствовать большее напряжение. С достаточной точностью для практических целей напряжение шлаковой ванны может быть определено так:

$$U_{шл} = 12 + \sqrt{125 + \frac{s}{0,075n_{эл}}}. \quad (129)$$

Глубина (мм) шлаковой ванны, от которой зависит устойчивость процесса и ширина провара, является важным параметром режима и может быть вычислена по формуле

$$h_{шл} = I_{св} (0,0000375 I_{св} - 0,0025) + 30. \quad (130)$$

Увеличение скорости сварки (м/ч) достигается за счет увеличения скорости подачи электрода и тока и уменьшения зазора, она может быть определена по уравнениям

$$v_{св} = n_{эл} \alpha_n I_{св} / (\gamma b s k_y), \quad (131)$$

или

$$v_{св} = n_{эл} v_{п.э} \pi d^2 / 4 / (\gamma b s k_y), \quad (132)$$

где k_y — коэффициент, учитывающий выпуклость шва, $k_y = 1,05 \div 1,1$.

Увеличение зазора между свариваемыми кромками вызывает рост ширины проплавления шва, но приводит к возрастанию необходимого количества металла для заполнения шва, что снижает производительность. Уменьшение зазора увеличивает производительность сварки, но это приведет к снижению коэффициента формы шва, так как при неизменной глубине ванны ширина ее уменьшается, что увеличивает опасность появления горячих трещин в шве. Зазор надо подбирать по данным с. 262.

Увеличение сухого вылета электрода приводит к уменьшению провара в связи с тем, что при неизменной скорости подачи электрода сварочный ток уменьшается из-за предварительного нагрева электрода и повышения его сопротивления. Сухой вылет электрода принимается равным 60—70 мм.

Увеличение скорости поперечных колебаний уменьшает ширину провара. Эта величина выбирается в зависимости от скорости подачи электрода, причем перемещения должны быть обратно пропорциональными подаче.

Скорость поперечных перемещений (м/ч) может быть определена по формуле

$$v_{п.п} = 66 - 0,22s/n_{эл}. \quad (133)$$

Увеличение диаметра электродной проволоки приводит к увеличению ее упругости (жесткости) и при прохождении ее по изогнутым мундштукам, за счет интенсивного трения мундштуки быстро изнашиваются. Кроме того, увеличение диаметра проволоки также приводит к росту

ширины провара и уменьшению глубины металлической ванны. Поэтому наиболее рационально применение проволоки диаметром до 3 мм. Но при подаче проволоки через направляющие и изгибающие ролики возникает возможность применения проволоки большего диаметра.

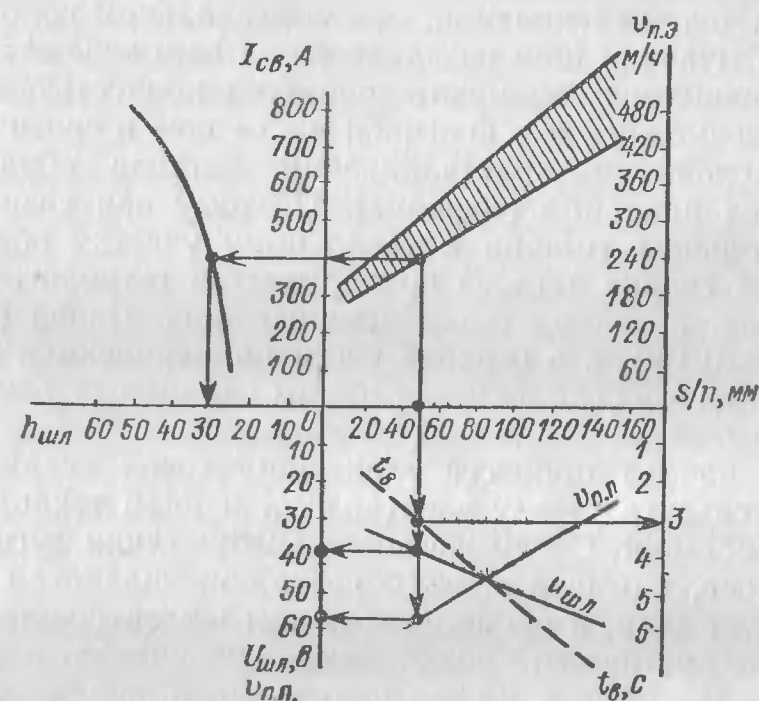


Рис. 123. График для выбора режимов электрошлаковой сварки проволочным электродом в зависимости от отношения толщины к числу электродов

Время выдержки у ползуна определяем по формуле

$$t_b = 0,0375s/n_{эл} + 0,75. \quad (134)$$

Расстояние между электродами при поперечных перемещениях

$$m = s/n_{эл} + 8; \quad (135)$$

без поперечных перемещений

$$m = s/n_{эл}. \quad (136)$$

Недоход электрода до ползунов принимают равным 5—7 мм.

Режим электрошлаковой сварки в зависимости от отношения толщины к числу электродов может быть определен по графику, представленному на рис. 123.

§ 38. ТЕХНОЛОГИЯ
ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ
ПРЯМОЛИНЕЙНЫХ И КОЛЬЦЕВЫХ ШВОВ

Электрошлаковая сварка прямолинейных швов выполняется, как правило, при вертикальном положении оси шва. Начало шва на длине 30—40 мм вследствие не установившегося теплового процесса полностью проварить невозможно, а в конечной части шва в связи с особыми условиями кристаллизации металла образуется усадочная раковина (трещина). Поэтому при сварке металла больших толщин к начальному участку подготовленных к сварке деталей приваривается технологическая приставка, имеющая вырез немного шире зазора (глубиной 50—70 мм), а в верхней части привариваются выводные планки высотой не менее 100 мм для вывода усадочной раковины.

Для начала процесса электрошлаковой сварки возбуждается дуга между электродами и дном технологической приставки. Сразу же после возбуждения дуги засыпают флюс, который после образования шлаковой ванны шунтирует дугу, и процесс переходит в электрошлаковый.

Чтобы устранить возможность непровара в начале соединения, сварка на технологической приставке производится без перемещения автомата при небольшой глубине шлаковой ванны, сниженном токе и повышенном напряжении. После установления теплового процесса и провара кромок глубина шлаковой ванны, ток и напряжение устанавливаются в пределах, предусмотренных выбранным режимом сварки. Конец шва следует завершить в выводных планках при пониженном токе и повышенном напряжении.

Электрошлаковая сварка кольцевых швов проволочными электродами значительно сложнее прямых швов. Основная трудность заключается в осуществлении замыкания начала и конца кольцевого шва. Сборка, как и при прямолинейных швах, производится на скобах, устанавливаемых на внутренней стороне изделия. Сварка производится специальными аппаратами на роликовых стендах при формировании шва с лицевой стороны медным охлаждающим ползуном 2, укрепленным на сварочном аппарате 1 (рис. 124, а), а с обратной стороны шва медным охлаждаемым кольцом 4, прижимаемым при помощи клиньев 6, вбиваемых в пространство между сборочными скобами

5 и кольцом. Иногда формирование обратной стороны шва осуществляется охлаждаемым ползуном, прижимающимся к кромкам изделия с помощью специального устройства.

При сварке кольцевых швов применять технологическую приставку не представляется возможным, начинать сварку приходится в рабочей части шва на планке 3, установленной в зазоре между кромками, но этот участок шва

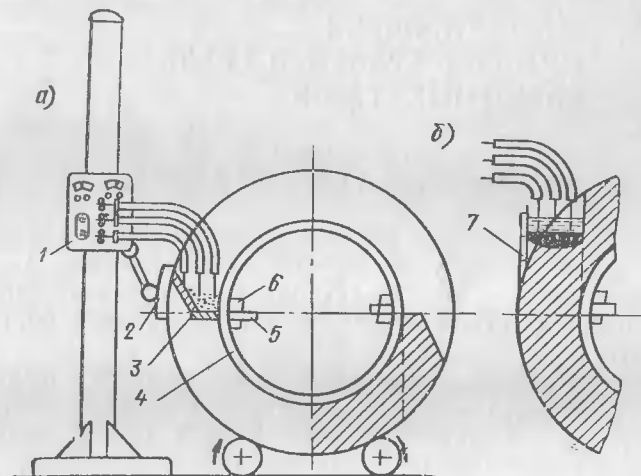


Рис. 124. Электрошлаковая сварка кольцевых швов: а — начало сварки; б — замыкание кольцевого шва

получается дефектным, поэтому воздушно-дуговым строгачом или газовым резаком ему придают такую форму, чтобы в момент замыкания начало шва представляло вертикальную стенку.

Для уменьшения объема работ по разделке начала шва сварка кольцевых швов начинается в полости, образуемой двумя планками. Сначала сварка в полости производится одним электродом при большом вылете, по мере увеличения ширины полости в работу вводятся другие электроды. Полость заваривают при вертикальном перемещении сварочного аппарата и неподвижном изделии. Изделие приводится во вращение лишь после полной заварки полости между планками, при этом вертикальное перемещение аппарата прекращается.

После того как разделанное начало шва занимает вертикальное положение, на него устанавливается охлажда-

ждаемый водой медный кокиль 7, вращение изделия прекращается, и заварка конца кольцевого шва производится при вертикальном подъеме сварочного аппарата. Трудности замыкания конца шва с началом тем больше, чем больше отношение толщины стенки к диаметру.

ГЛАВА VIII. ТЕХНОЛОГИЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ

§ 39. ПОСТ ДЛЯ СВАРКИ В УГЛЕКИСЛОМ ГАЗЕ И ЕГО ОСНАСТКА

В настоящее время в народном хозяйстве значительное место занимает дуговая сварка в среде защитных газов и благодаря ее технологическим и экономическим преимуществам объем ее применения все больше возрастает.

Технологическими преимуществами являются относительная простота процесса сварки, возможность полуавтоматической и автоматической сварки швов, находящихся в различных пространственных положениях, что позволяет механизировать сварку в различных пространственных положениях, в том числе сварку неповоротных стыков труб. Небольшой объем шлаков, участвующих в процессе сварки в CO_2 , позволяет в ряде случаев получить швы высокого качества.

Сварка в среде защитных газов применяется как для соединения различных сталей, так и цветных металлов и таких активных, как титан, цирконий, тантал и др.

Для сварки в защитных газах кроме источника питания дуги требуются специальные приборы и оснастка. Рассмотрим схему поста для сварки в углекислом газе (рис. 125). Сварочный пост состоит из электрической и механической частей и газовой магистрали. В электрическую часть поста входят: источник питания 7, пульт управления 8 и цепь сварочного тока. В механическую часть поста входят: механизм подачи сварочной проволоки 10, газозлектрическая горелка 11 и устройства для размещения и закрепления деталей 9. Газовая магистраль включает баллон с газом 1, шланги для подачи газа и сле-

дующие газовые приборы: подогреватель 2, осушитель 3, редуктор 4, расходомер (ротаметр) 5, газозлектрический клапан 6. При сварке в смеси газов пост дооборудуется смесителем. Подогреватели и осушители применяются только при сварке в углекислом газе. В ряде случаев горелки охлаждаются водой.

Подогреватели служат для подогрева углекислого газа, поступающего из баллона, так как при выпуске углекислоты из баллона вследствие испарения жидкости тем-

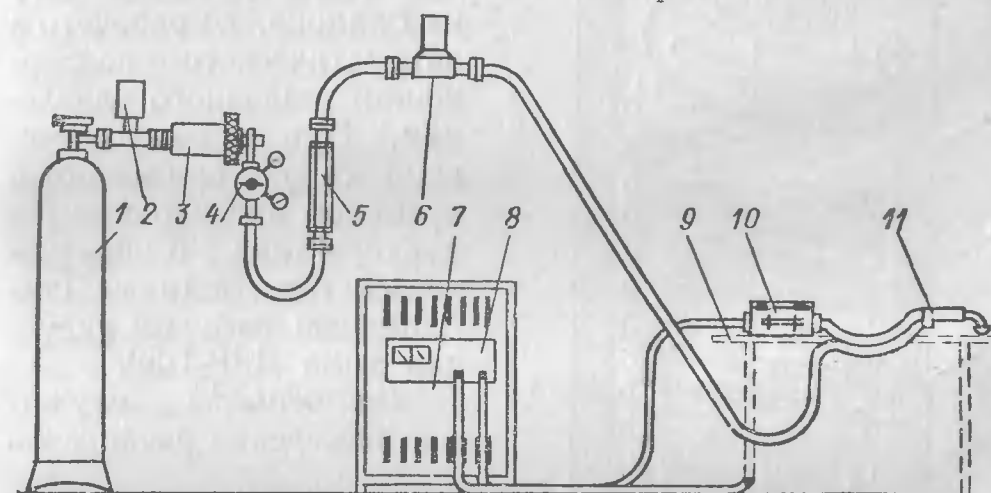


Рис. 125. Пост для сварки в среде углекислого газа

пература газа значительно уменьшается, а при значительном расходе газа возможно замерзание редуктора.

Применяемый электрический подогреватель (рис. 126) состоит из корпуса 1, кожуха 2, трубчатого змеевика 3, теплоизоляции 4 и нагревательного элемента 5. Питание нагревательного элемента производится переменным током, напряжением 36 В, который подводится к клеммам 6. Газ, проходя по трубчатому змеевику, нагревается до температуры 10—15 °С. В последнее время подогреватели включаются параллельно с газозлектрическим клапаном (см. рис. 132).

Осушители (рис. 127) предназначены для поглощения влаги, содержащейся в углекислом газе. В зависимости от давления применяются два вида осушителей: высокого давления (рис. 127, а) и низкого давления (рис. 127, б). Они состоят из корпуса 1, крышки 5, решеток 2, фильтров 3 и влагопоглотителя 4. Кроме того, осушитель высокого давления снабжен пружиной 6, предназначенной

для уплотнения влагопоглотителя. Фильтры 3 служат для отделения от газа твердых частиц.

В качестве влагопоглотителя используется силикагель, медный купорос или хлористый кальций. Влагопоглотители перед заправкой в осушители прокачивают при температуре 250—300 °С в течение 1—2 ч.



Рис. 126. Электрический подогреватель газа

за. При сварке в защитных газах применяются расходомеры поплавкового типа (РС-3, РС-5), расходомеры дроссельного, калиброванного и редукторного типа без блокировки и с блокировкой сварочного тока по воде и газу.

Расходомер поплавкового типа (ротаметр) — рис. 128, а — состоит из стеклянной конусной трубки 1 со шкалой, куда помещен поплавок 2. Трубка размещается в металлическом кожухе 3. На кожух надеваются накидные гайки 4 с ниппелями, на которые надевают шланги. Газ, подводимый снизу, поднимает поплавок в сторону большего диаметра трубки, увеличивая кольцевой зазор между поплавком 2 и трубкой 1. В определенном месте поплавок

остановится — это означает, что вес поплавка уравновесится напором проходящего газа. Шкала расходомера РС-3 отградуирована на расход воздуха (рис. 129). Защитные газы легче или тяжелее воздуха, поэтому для них вводят поправочные коэффициенты k :

Азот N_2	1,020
Аргон Ar	0,850
Водород H_2	3,80
Гелий He	2,70
Кислород O_2	0,955
Углекислый газ CO_2	0,810

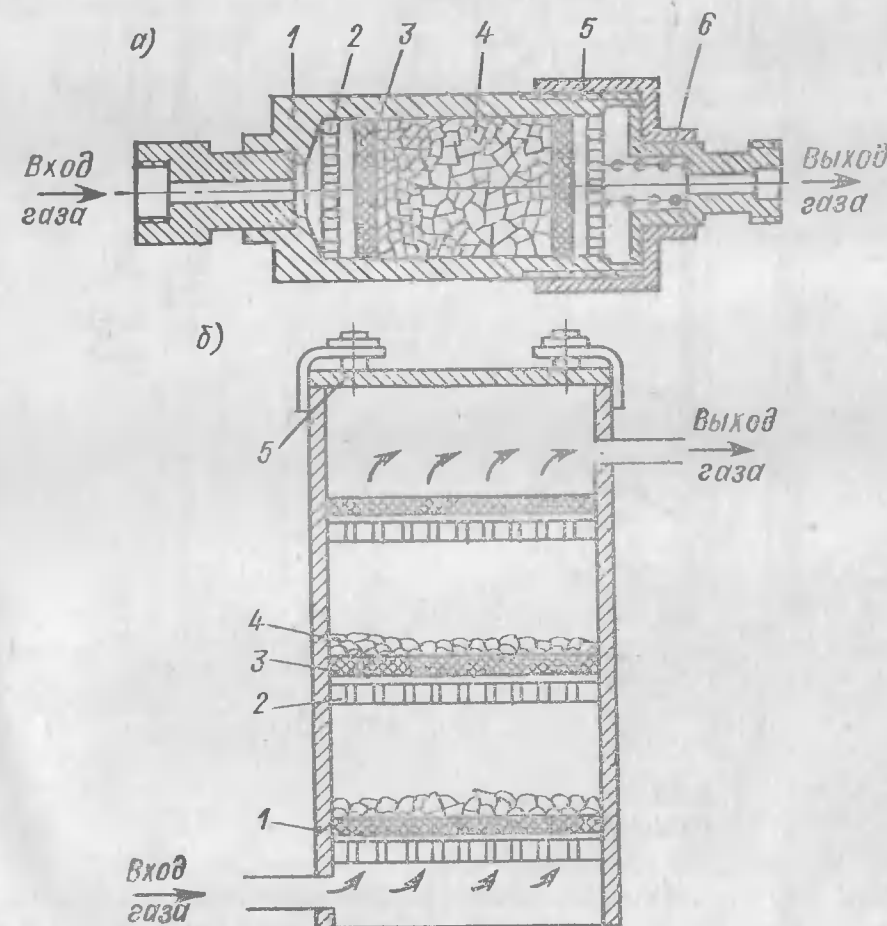


Рис. 127. Осушители

Например, показание шкалы расходомера 60; проводя перпендикулярную линию из этой точки до пересечения с кривой расхода воздуха, получим, что расход воздуха составит 700 л/ч. Допустим, что газ, применяемый при сварке, — аргон; поправочный коэффициент для него равен 0,850. Объемный расход аргона $v_{Ar} = v_{возд} k =$

$= 700 \cdot 0,850 = 595$ л/ч и соответственно рассмотренному можно определить расход и других газов.

Поплавки изготавливаются из алюминия, эбонита и стали и имеют различный вес, что значительно влияет на показания ротаметра, поэтому менять поплавки в рота-

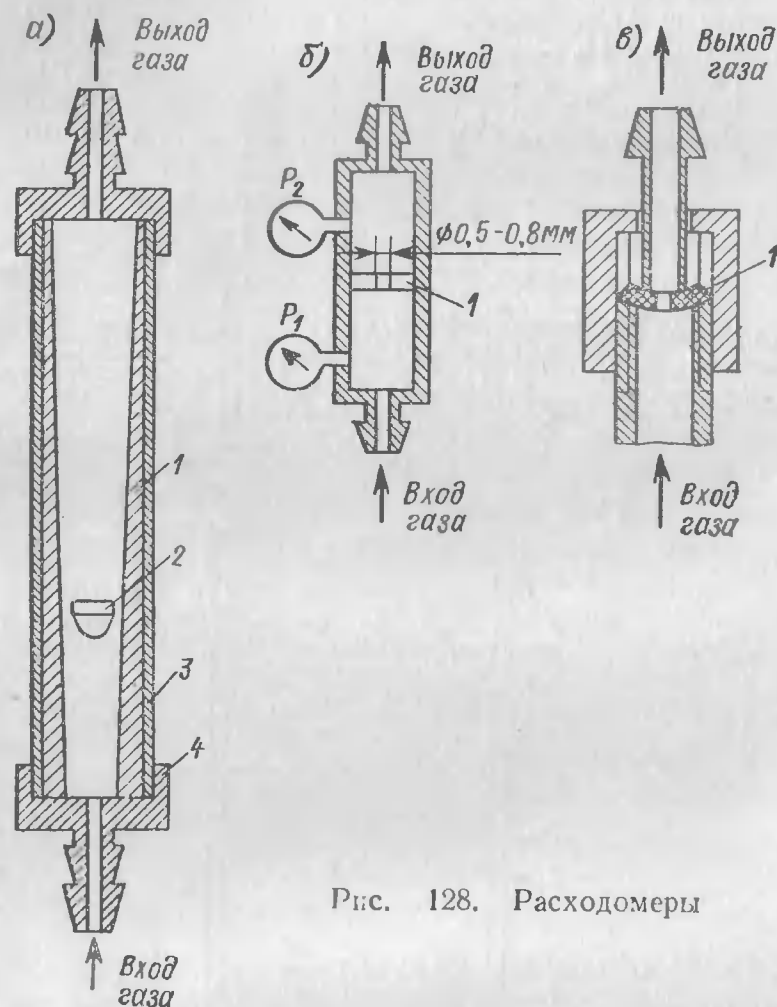
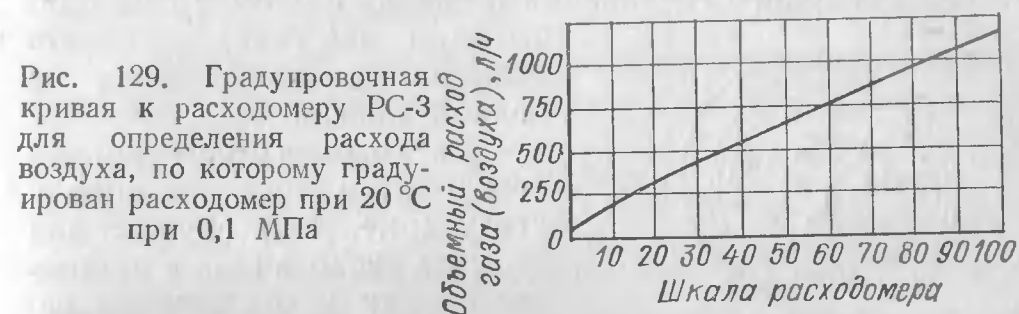


Рис. 128. Расходомеры

метрах нельзя. Недостатком расходомеров поплавкового типа является частый выход из строя стеклянных трубок и возможность их работы только в строго вертикальном положении.

Расходомер дроссельного типа (см. рис. 128, б) работает по принципу измерения перепада давления до и после дросселирующей диафрагмы 1, которая делит цилиндрическую камеру пополам. Давление в каждой половине камеры контролируется манометрами P_1 и P_2 , манометр P_2 отградуирован на расход газа.

Расходомер калиброванного типа (см. рис. 128, в) устанавливается при работе на постоянном расходе газа. Расходомеры такого типа заменяют любые типы расходомеров. Диаметр отверстия диафрагмы 1 выбирается опытным путем. Если необходимо в процессе работы изменить



расход газа, это достигается в некоторых пределах за счет увеличения рабочего давления на редукторе, а в больших пределах — набором калиброванных шайб (диафрагм).

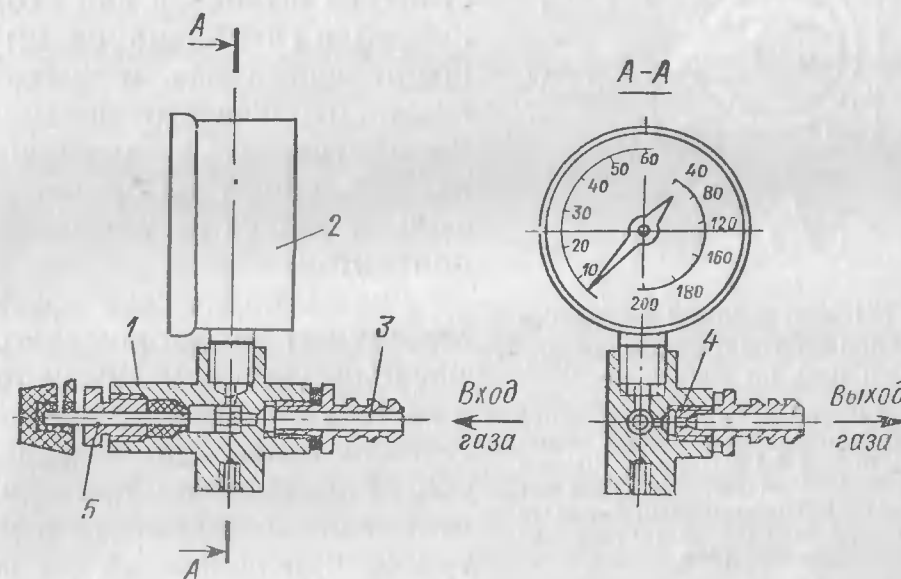


Рис. 130. Расходомер-регулятор редуторного типа без блокировки сварочного тока по воде и газу

Расходомер-регулятор без блокировки сварочного тока по воде и газу (рис. 130) позволяет измерять и регулировать расход газа. Он состоит из корпуса 1, манометра 2. В корпусе закреплены два штуцера для входа и выхода газа 3. Перед штуцером для выхода газа размещена диафрагма 4 с отверстием, диаметр которого выбирается в зависимости от рода применяемого газа и пределов регулирования, которая осуществляется игольчатым вентилем 5.

Преимуществом расходомера такого типа по сравнению с другими является то, что такие расходомеры работают в любом пространственном положении и обладают малыми массой и габаритными размерами.

При сварке с поддувом защитного газа с обратной стороны сварного соединения и сварке в смеси газов применяют два таких же расходомера, расположенных на одной панели.

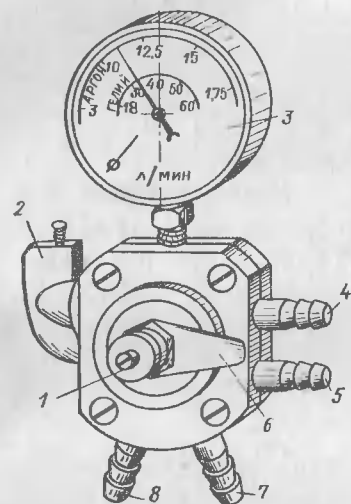


Рис. 131. Расходомер редукторного типа с блокировкой сварочного тока по воде и газу:

1 — регулируемый контакт; 2 — рукоятка запорного вентиля; 3 — манометр МТ-60 0,4 МПа; 4 — штуцер входа газа; 5 — штуцер входа воды; 6 — лепесток контакта; 7 — штуцер выхода воды; 8 — штуцер выхода газа

Электрогазовый клапан (рис. 132) состоит из корпуса 1, штуцера 2, кожуха 3, служащего для крепления катушки 4 при помощи винта 5 и подвижного сердечника 8 с рабочей пружиной 7. Резиновая прокладка 9 служит для герметизации клапана. Питание подводится по проводам 6. Корпус клапана 1 и корпус катушки 4 выполняются из немагнитного материала, винт и подвижный сердечник — из стали марки 10 или 15, а кожух — из низкоуглеродистой стали.

В настоящее время применяются газозлектрические клапаны совместно с реле времени, обеспечивающие по-

дачу газа после отключения сварочного тока до полного остывания металла шва, что особенно важно при сварке активных металлов.

Смесители предназначены для смешивания газов и автоматического поддержания постоянства состава смеси. Они могут быть применены для получения различных смесей.

Газозлектрическая горелка является одним из важнейших узлов установки для сварки в защитных газах. От

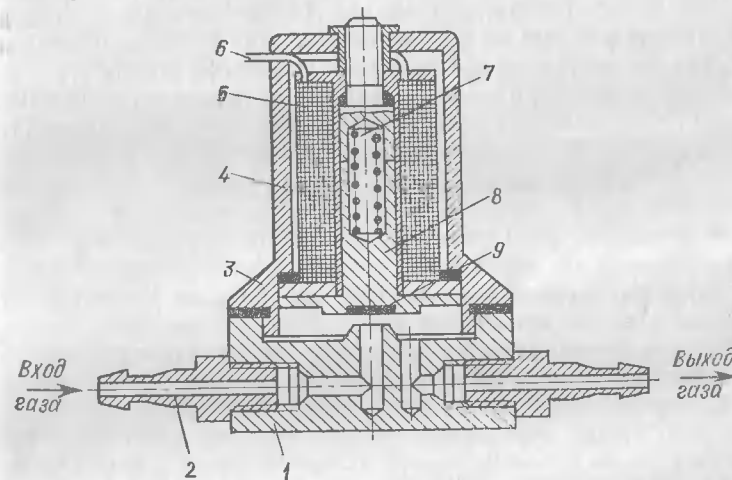


Рис. 132. Газозлектрический клапан (в рабочем положении)

совершенства конструкции горелки зависит ряд технологических факторов процесса и качество выполнения сварки. Сварочные горелки предназначаются для подведения к неплавящемуся или плавящемуся электроду сварочного тока и защитной струи газа. В зависимости от габаритов, массы и силы тока, применяемого для сварки, горелки делятся на малые, средние и большие, а также на горелки с водяным или газовым охлаждением и без охлаждения.

Выбор типа горелки должен производиться в каждом конкретном случае в зависимости от требуемой силы тока, определяемой толщиной и свойствами основного металла; от удобства выполнения швов в конструкции (возможность подвода горелки в неудобных или труднодоступных местах, глубоких разделках и т. п.); от продолжительности процесса сварки и др.

Сейчас рядом институтов и заводов разработаны различные конструкции сварочных горелок, удовлетворяющих в основном требованиям производства.

§ 40. РЕЖИМЫ И ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ В СРЕДЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

Режим сварки в углекислом газе составляют в основном те же параметры, что и режим сварки под слоем флюса и дополнительно расход газа. Влияние каждого параметра режима на формирование шва и производительность при постоянстве остальных во многом подобно ранее рассмотренному при сварке под слоем флюса, но особенно следует рассмотреть влияние расхода газа и полярности.

Влияние объемного расхода газа

Расход углекислого газа в значительной степени влияет на качество сварного шва. Необходимое для сварки количество газа зависит от режима сварки и от формы и размеров свариваемого изделия.

С увеличением расхода газа снижаются значения коэффициентов плавления и наплавки, так как при этом столб дуги охлаждается поступающим в зону сварки углекислым газом. Но малый расход газа не удовлетворяет требованиям газовой защиты. Следовательно, расход углекислого газа должен быть минимальным, но достаточным для создания надежной защиты расплавленного металла от окружающей атмосферы. При сварке проволокой диаметром 0,8—1,2 мм объемный расход CO_2 составляет 6—10 л/мин, а проволокой диаметром 1,6—2,0 мм — 10—20 л/мин. При этом наименьший расход газа происходит при сварке тавровых соединений и соединений в лодочку, при сварке стыковых швов — среднее, при сварке угловых соединений — наибольшее. Это связано с тем, что условия защиты сварочной ванны в значительной мере зависят от типа соединения и положения шва.

На расход CO_2 существенное влияние оказывает и скорость перемещения дуги. С повышением скорости перемещения дуги расход CO_2 надо увеличить, чтобы улучшить защиту сварочной ванны CO_2 . При большей скорости перемещения дуги и недостаточном количестве CO_2 сварочная проволока и ванна расплавленного металла не будут иметь нужной защиты.

Повышение расхода CO_2 при прочих постоянных факторах приводит к некоторому увеличению выгорания раскислителей — кремния и марганца — и практически не влияет на содержание углерода в металле шва.

Влияние полярности тока

Сварку в среде CO_2 плавящимся электродом производят на постоянном токе обратной полярности. Это объясняется тем, что при прямой полярности процесс сварки характеризуется большим разбрызгиванием даже при сварке значительно меньшими токами. Это приводит к уменьшению глубины провара. Хотя коэффициент плавления электродной проволоки при сварке на обратной полярности в 1,5—1,8 раза меньше, чем при сварке на прямой полярности, это преимущество в большинстве случаев не удается использовать, так как при сварке на прямой полярности ширина шва значительно меньше, а высота выпуклости больше, чем при сварке на обратной полярности. Кроме того, сварка на прямой полярности характеризуется увеличением окисления элементов и повышением склонности шва к образованию пор. Но в некоторых случаях при сварке угловых швов в соединениях впритык и многопроходных стыковых швов применяют прямую полярность.

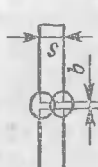
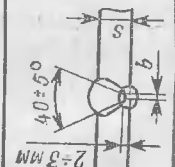
Выбор режима сварки в среде углекислого газа

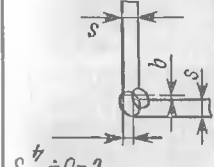
В связи с отсутствием расчетной методики определения режима сварки в среде CO_2 режимы подбираются на основании обобщений опытных данных, приведенных в табл. 36, а режимы односторонней и двусторонней сварки в среде CO_2 в нижнем положении тавровых соединений проволокой диаметром 1,6 мм приведены на рис. 133. Методика определения режима по номограмме такая же, как и рассмотренная выше для сварки угловых швов под слоем флюса (см. с. 252).

С увеличением толщины стыкового соединения или катета углового шва режимы по сравнению с оптимальными (для толщин 20—24 мм или $k = 8$ мм) остаются теми же, а число проходов увеличивается.

Разбрызгивание металла при дуговой сварке, особенно при сварке в углекислом газе является основным недо-

Таблица 36. Режимы сварки в среде CO_2 некоторых видов соединений

Толщина металла, мм	Эскиз подготовленного соединения и выполненного шва	Зазор b , мм	Режим сварки					Объемный расход CO_2 , л/мин
			Число проходов	Диаметр электрода, мм	Сила сварочного тока, А	Напряжение на дуге, В	Скорость подачи проволоки, м/ч	
1 2		0+1	1 1	0,8 1,0	50—60 90—100	17—18 19—20	100 150	8—10 8—10
3		0+1,5	1 2	1,2 1,2	170—180 130—140	22—23 21—22	215 180	8—10 8—10
4			1 2	1,6 1,2	220—240 150—160	25—27 21—22	215 220	15—16 9—10
6			1 2	2,0 2,0	300—320 280—300	28—30 28—30	215 170	15—16 15—16
8 10 12			1—2 1—2 1—2	2,0 2,0 2,0	330—350 360—380 390—410	28—30 30—32 30—32	215 280 280	15—16 18—20 18—20
14 18 20 24		0+1,5	1—2 1—3 1—4 1—5	2,0 2,0 2,0 2,0	430—450 430—450 430—450 430—450	32—34 32—34 32—34 32—34	360 360 360 360	24—25 24—25 24—25 24—25

2 4		0+1	1—2 1—2	1,2 1,2	100—120 160—180	21—22 21—22	130 240	9—10 9—10
8		0+1,5	1—2	2,0	330—350	28—30	245	18—20

статком. Задача по уменьшению брызг решается путем совершенствования источников питания дуги, подбора сварочных материалов, газовых смесей, а также нанесения на поверхности соединяемых деталей защитных покрытий. Последнее является одним из простых способов уменьшения попадания брызг на поверхность свариваемого металла и облегчает их удаление.

Различают пять видов покрытий: раствор мела в воде; раствор мела, алюминиевого порошка в жидком стекле плотностью $1,1—1,2 \text{ г/см}^3$, покрытие на основе лака, кремнийорганическое покрытие, покрытие на основе антикоррозионных грунтов.

Из первых трех видов покрытий лучшим является покрытие на основе лака, оно быстро сохнет, в процессе сушки образует стойкую плотную пленку, и его можно использовать при многопроходной сварке. Недостатком этих покрытий является необходимость их удаления с поверхности изделия перед его покраской.

Кремнийорганическая жидкость, например ГКЖ-94, лишена этого недостатка, обладает высокой термостойкостью как после нанесения на поверхность металла, так и после высыхания. Эти покрытия сохраняют свои свойства при наплавке шести и более слоев. Они также могут применяться для защиты от брызг сборочных приспособлений, наконечников и мундштуков сварочного оборудования. Антикоррозионные грунты типа ВЛ-02, ВЛ-023 при использовании как покрытие толщиной слоя $20—25 \text{ мкм}$ для защиты от брызг при сварке не ухудшают механических свойств металла шва и сварного соединения. Капли металла при сварке, попадая на грунтовую поверхность, вызывают мгновенно

венное испарение органических составляющих грунта в месте контактирования, что предотвращает приваривание брызг к основному металлу.

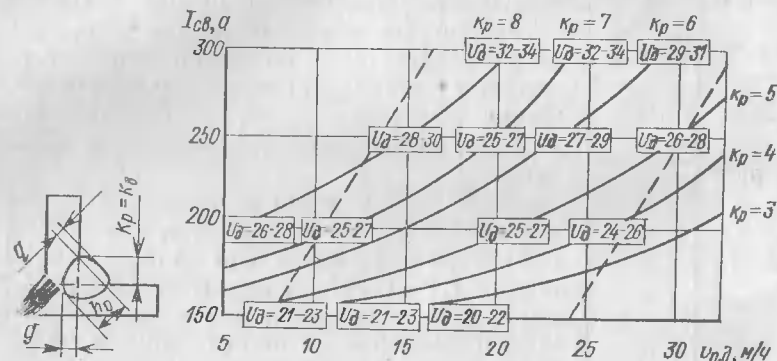


Рис. 133. Номограмма для определения режимов односторонней и двусторонней полуавтоматической сварки в CO_2 нижних швов тавровых соединений электродом диаметром 1,6 мм:

— — — граница удовлетворительного формирования шва; q — глубина проплавления стенки; K_B и K_P — видимый и расчетный катеты шва; h_0 — действительное опасное сечение

Технология сварки в среде CO_2

При полуавтоматической и автоматической сварке в среде CO_2 существенное влияние на качество сварных соединений оказывает техника сварки. От расстояния, угла наклона и характера движения горелки относительно свариваемых деталей зависит надежность газовой защиты зоны сварки от окружающей атмосферы, скорость охлаждения металла, форма шва и т. д.

Сварка в среде CO_2 может производиться во всех пространственных положениях. Сварка вертикальных и потолочных швов должна производиться при меньшем сварочном токе и проволокой небольшого диаметра (до 1,4 мм).

Перед началом сварки необходимо отрегулировать расход газа и выждать 20—30 с до полного удаления воздуха из шлангов. Несоблюдение этих правил может привести к появлению пор в начале шва. Зажигание дуги при сварке в среде CO_2 на токах свыше 200 А не представляет затруднения. Перед зажиганием дуги необходимо следить, чтобы вылет электрода из мундштука не превышал 40—45 мм. Зажигание дуги при большом вылете электрода

может привести к плохому формированию начала шва и появлению в нем пор. Сварку в среде CO_2 следует производить при возможно более короткой дуге. При сварке на токах 200—500 А длина дуги должна находиться в пределах 1,5—4,0 мм. Увеличение длины дуги увеличивает разбрызгивание металла и угар легирующих элементов. При движении горелки дуга должна находиться на основном металле или на границе сварочной ванны с основным металлом. Задержка дуги на сварочной ванне увеличивает разбрызгивание и приводит к образованию пор в шве.

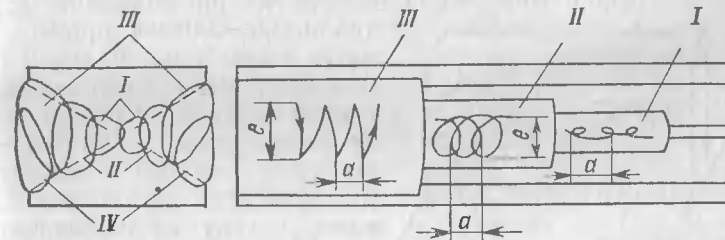


Рис. 134. Схема колебательных движений горелки при полуавтоматической сварке стыковых швов в среде CO_2 :

I — $a = 3 \div 10$ мм; II — $a = 3 \div 20$ мм; $e = 8 \div 15$ мм; III—IV — $a = 2 \div 5$ мм; $e = 15 \div 25$ мм

Сварка в нижнем положении производится с наклоном горелки вперед или назад под углом $\alpha = 5 \div 15^\circ$. Предпочтительнее вести сварку углом назад, при этом обеспечивается более надежная защита расплавленного металла и лучший вид шва.

При полуавтоматической сварке металла толщиной 1—2 мм поперечных колебаний горелки не производят. Сварку ведут на максимально возможной длине дуги, с максимальной скоростью сварки, при которой обеспечивается хорошее формирование сварного шва и удовлетворительная газовая защита (практически такая скорость равна 30—50 м/ч); горелку ведут с наклоном к изделию под углом 30—45°.

При сварке стыковых швов на металле большой толщины применяются те же приемы сварки, что и при ручной дуговой сварке толстопокрытыми электродами;

1) возвратно-поступательное вдоль оси шва (без поперечных колебаний) при сварке однослойных швов, а также при выполнении первого прохода и подварочного шва при сварке многослойных швов (рис. 134, I); по вы-

тянутой спирали при сварке средних слоев многослойных швов (рис. 134, II); 2) змейкой при сварке верхних слоев многослойных швов (рис. 134, III). При ширине разделки больше 14—16 мм последующие слои рекомендуется выполнять в два прохода.

Стыковые соединения толщиной 1,5—3 мм свариваются на весу. Более тонкий металл сваривают в вертикальном положении на спуск (сверху вниз), причем провар соединения достигается за один проход, при этом шов хорошо формируется как с лицевой, так и с обратной стороны стыка. Сварка соединений внахлестку при толщине металла 0,8—2,0 мм производится на весу или на медной подкладке. При качественной сборке соединений внахлестку расходуется сравнительно мало электродного металла, что дает возможность вести сварку со скоростью 60—80 м/ч.

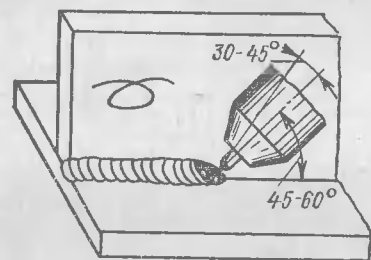


Рис. 135. Схема положения и перемещения горелки при сварке тавровых соединений

Соединения внахлестку сваривают при вертикальном положении электрода и направляют его на срез верхнего листа. В случае плохой сборки при наличии зазоров между листами электрод следует наклонять поперек шва на угол 50—60° к горизонту и направлять его на срез верхнего листа.

Сварка угловых швов производится при больших толщинах петлеобразным перемещением горелки. Применяемые при этом углы наклона горелки показаны на рис. 135. Если обычная техника сварки не обеспечивает получение плотных швов, выполненных на кипящих и полураскисленных сталях, то пористость швов может быть уменьшена путем применения сварки «захлестыванием».

Уменьшение количества пор при сварке захлестыванием достигается за счет дополнительного подогрева, лучшего перемешивания и замедленного охлаждения металла сварочной ванны при колебании горелки вдоль оси шва, что обеспечивает более полное выделение водорода из сварочной ванны.

Вертикальные швы на тонком металле, как правило, выполняются сверху вниз. При зажигании дуги для получения провара в начале шва электрод располагают пер-

пендикулярно свариваемой поверхности, а затем несколько наклоняют углом назад. Чтобы получить более широкий валик и лучшее проплавление кромок, сварку производят с небольшими поперечными колебаниями электрода. Сварка металла толщиной более 2 мм может успешно выполняться снизу вверх, электрод при этом наклоняется углом назад. Глубина провара в этом случае больше, чем при сварке сверху вниз, сварку снизу вверх производят с поперечными колебаниями при короткой дуге.

Сварка горизонтальных швов по технике выполнения близка к технике сварки вертикальных швов сверху вниз. Для предупреждения стекания металла ванны, сварку рекомендуется производить при короткой дуге без поперечных колебаний электрода.

Сварка швов в потолочном положении гораздо труднее, чем сварка швов других типов. Однако сваривать эти швы полуавтоматической сваркой тонкой электродной проволокой в среде CO_2 легче, чем ручной электродуговой сваркой. Главным требованием при выполнении сварки в потолочном положении является минимальное напряжение дуги. Электрод располагают углом назад для предупреждения стекания металлической ванны. Рекомендуется также увеличивать расход углекислого газа. При выполнении потолочных швов диаметр электродной проволоки и сварочный ток должны быть меньше, чем при сварке швов в нижнем положении (с целью уменьшения объема сварочной ванны). Для получения широких швов сварку следует вести с поперечными перемещениями электрода или в несколько проходов.

Вертикальная автоматическая сварка в среде CO_2 с принудительным формированием шва имеет ряд преимуществ перед электрошлаковой сваркой вертикальных швов металла толщиной 10—40 мм.

1. Благодаря отсутствию расплавленного флюса имеется возможность значительно уменьшить вылет электрода, что уменьшает блуждание конца электродной проволоки и позволяет использовать проволоку небольшого диаметра.

2. Меньший зазор в свариваемом стыке увеличивает производительность процесса.

3. Возникает возможность сваривать металл толщиной от 8 мм, прекращать и возобновлять процесс варки в любой точке стыка без ухудшения качества шва.

4. Большая скорость охлаждения металла соединения позволяет получить мелкозернистую однородную структуру участков шва, примыкающих к ползунам и в определенной мере к основному металлу, и др.

Вертикальная сварка с принудительным формированием шва в среде CO_2 может производиться на постоянном токе модернизированными автоматами, предназначенными для электрошлаковой сварки или на специальных автоматах. При этом электродная проволока 1 подается в плавильный колодец (рис. 136) по радиусу с помощью специального мундштука. Формирование шва осуществляется двумя медными ползунами 5 небольших размеров охлаждаемыми проточной водой или сжатым воздухом.

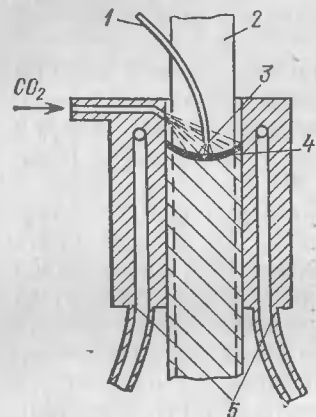


Рис. 136. Схема сварки в среде CO_2 с принудительным формированием шва:

1 — электродная проволока; 2 — основной металл; 3 — сварочная дуга; 4 — сварочная ванна; 5 — охлаждаемые ползуны

изводительность. Для толщины 8—30 мм оптимальным считается зазор 10 ± 2 мм.

Наличие плавильного колодца даже при незначительном расходе CO_2 обеспечивает надежную защиту капель и ванны расплавленного металла. Поэтому хорошее качество шва получается даже при ветре и сквозняке. Благоприятные условия дегазации и кристаллизации металла ванны, повышенный коэффициент усвоения легирующих и раскисляющих элементов из проволоки обеспечивают высокое качество и плотность швов без каких-либо дефектов. Даже наличие влаги на поверхности свариваемых кромок не влияет на качество, так как открытая дуга и поток горячих газов и воздуха из плавильного колодца осушают кромки стыка на расстоянии 80—100 мм от зоны горения дуги.

Таблица 37. Режимы вертикальной автоматической сварки в среде CO_2 с принудительным формированием

Толщина, мм	Сила сварочного тока, А	Напряжение на дуге, В	Зазор, мм	Объемный расход CO_2 , л/мин	Скорость перемещения дуги, м/ч
8	250—300	28—30	10 ± 2	5	12—13
10	250—300	30—32	10 ± 2	5	11—12
12	250—300	32—34	10 ± 2	5	10—11
14	300—350	34—36	10 ± 2	6	8—9
16	300—350	34—36	10 ± 2	6	7—8
18	350—400	36—38	10 ± 2	6	6—7
20	350—400	36—38	10 ± 2	6	5—6
24	400—450	38—40	10 ± 2	6	4—5

Микроструктура швов имеет столбчатое строение и типичные для вертикальной сварки с принудительным формированием линии роста кристаллов, направленные радиально к оси шва. По мере приближения к вертикальной оси кристаллы загибаются кверху, что обеспечивает получение швов, не склонных к образованию горячих трещин.

Сварочные автоматы для вертикальной сварки в среде CO_2 с принудительным формированием шва в связи с необходимостью сварки швов стыков, имеющих отклонение от вертикали до 35° , должны перемещаться непосредственно по стыку и иметь систему автоматического регулирования уровня сварочной ванны, а также позволять без дополнительной настройки продолжать сварку при изменении в определенных пределах толщины металла по длине стыка. Режимы вертикальной автоматической сварки в среде CO_2 с принудительным формированием на постоянном токе обратной полярности приведены в табл. 37.

Сварка в среде инертных газов находит исключительно широкое применение при изготовлении конструкций из цветных и легких металлов, изделий из высоколегированных сталей малых толщин, а сварка титана, его сплавов и других активных металлов фактически возможна только в инертных газах.

Технологические особенности сварки различных металлов и их сплавов в среде инертных газов, методика выбора режимов будут рассмотрены далее, при изучении технологии сварки каждого металла в отдельности.

ГЛАВА IX. ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

§ 41. ГРУППЫ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ И ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ

Простые углеродистые стали не могут удовлетворить потребности народного хозяйства, поэтому в настоящее время широкое распространение получили легированные стали. К ним относятся стали, в состав которых введены легирующие элементы, отсутствующие в обычных углеродистых сталях или имеющие повышенное против допустимого в углеродистых сталях содержание марганца и кремния. Марганец считается легирующим элементом при содержании его более 1,0 %, а кремний — более 0,8 %. Благодаря применению легированных сталей появляется возможность снижения массы изделия, что экономит значительное количество металла и повышает грузоподъемность судов, вагонов и других конструкций. В зависимости от содержания легирующих элементов легированные стали делятся на три основные группы:

- 1) низколегированные, в которых суммарное содержание легирующих элементов не более 2,5 %;
- 2) легированные — с содержанием легирующих элементов от 2,5 до 10 %;
- 3) высоколегированные — с содержанием легирующих элементов более 10 %.

Для более четкого уяснения трудностей, с которыми приходится сталкиваться при сварке легированных сталей, рассмотрим влияние углерода и других элементов на механические свойства и свариваемость стали.

Углерод повышает прочность, чувствительность к перегреву, закаливаемость, понижает пластичность и вязкость. Поэтому в низколегированных сталях содержание углерода не должно превышать 0,25 %, а в тех случаях, когда к свариваемости стали предъявляются более высокие требования, верхний предел по углероду ограничивается 0,14 %, а при наличии в стали повышенного количества марганца, хрома и других элементов содержание углерода должно быть еще меньше.

Марганец в сталях повышает прочность и мало влияет на пластичность, а при содержании до 1,2 % повышает и ударную вязкость. Рационально повысить его содержание до 1,8 % при ограничении содержания углерода в стали до 0,14 %.

Кремний повышает предел прочности, при малом содержании углерода пластичность стали снижается незначительно. У стали, содержащей кремния более 0,6 %, увеличивается хладноломкость. С дальнейшим увеличением содержания кремния свариваемость стали ухудшается.

Хром усиливает закаливаемость стали особенно при увеличении содержания углерода. В небольших количествах он способствует повышению ударной вязкости при компактных и повышенных температурах. При малом содержании углерода и в присутствии марганца и кремния хром в количестве до 1 % не ухудшает свариваемость стали.

Никель повышает прочность и коррозионную стойкость стали, незначительно снижая ее пластичность. Введение в сталь никеля до 1,5 % уменьшает склонность к росту зерна и хладноломкость стали, не оказывая заметного влияния на ее закаливаемость и свариваемость. Но значительная стоимость и дефицитность никеля заставляют ограничивать его применение для легирования стали.

Молибден в количестве до 0,6 % повышает прочность и пластичность стали; его вводят в состав всех жаростойких и жаропрочных сталей в качестве упрочнителя феррита: он способствует повышению сопротивления ползучести стали при повышенных рабочих температурах. Молибден также повышает сопротивление отпускной хрупкости стали.

Ванадий повышает прочность и жаропрочность стали, так как обладает большим сродством к углероду, чем упрочнители феррита хром и молибден. Поэтому при нагреве стали образование карбидов будет происходить за счет ванадия, а хром и молибден останутся в твердом растворе, сохраняя сопротивление ползучести. В жаростойких сталях содержится 0,25—0,40 % ванадия.

Вольфрам повышает прочность стали при повышенных температурах, способствует образованию мелкозернистой структуры и снижает склонность стали к отпускной хрупкости.

Титан способствует образованию мелкозернистой структуры и подавляет вредное влияние углерода в отношении приобретения высоколегированной сталью склонности к межкристаллитной коррозии.

§ 42. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ И СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Низколегированные жаропрочные (теплоустойчивые) и низколегированные среднеуглеродистые стали находят широкое применение для изготовления сварных конструкций.

Сварка низколегированных теплоустойчивых сталей

Теплоустойчивой называют сталь, обладающую повышенной механической прочностью при высоких температурах и длительных постоянных нагрузках.

Наряду с обычными величинами, определяющими механические свойства стали, критерием механической прочности теплоустойчивой стали в нагретом состоянии служит предел ползучести и длительная прочность.

Ползучестью называется способность нагретого до определенной температуры металла под воздействием длительных постоянных нагрузок постепенно пластически деформироваться. Эти нагрузки значительно меньше нагрузок, вызывающих деформацию металла при кратковременном нагружении. Ползучесть оценивается напряжением, при котором через определенный отрезок времени (обычно десятки, сотни тысяч часов) при заданной температуре деформации ползучести получит заранее заданное значение, например 1—2 %.

Длительная прочность определяется напряжением, вызывающим разрушение металла при заданной температуре за определенный отрезок времени.

Наибольшее применение получили теплоустойчивые стали при изготовлении современных паровых энергетических установок, где наряду со сварными конструкциями нашли применение сложные по форме лито-сварные конструкции.

Для повышения теплоустойчивости сталей в их состав вводят легирующие элементы (Mo, W, V), энергично по-

вышающие температуру разупрочнения стали при нагреве. Для обеспечения теплоустойчивости сталей в их состав вводят хром, образующий плотную защитную пленку окислов на поверхности металлов.

Существует большое количество марок сталей с различным уровнем жаропрочности: так, стали марок 15ХМА, 20ХМА применяют для изготовления деталей паровых турбин, работающих при температурах до 520 °С, сталь 12Х1МФ — для изготовления узлов установок, работающих при температурах до 580 °С, а сталь 20ХМФЛ — до температуры 550—580 °С. Теплоустойчивые стали могут быть сварены всеми способами электрической сварки плавлением. Ручная сварка теплоустойчивых сталей производится электродами с основным фтористо-кальциевым покрытием. Electroды с покрытием этого типа обеспечивают повышенную раскисленность металла шва при малом содержании неметаллических включений и водорода, вследствие чего достигается высокая пластичность и ударная вязкость швов. Но перед их использованием во избежание образования пор в металле шва требуется их сушка при 150—200 °С. Ручная сварка должна производиться возможно короткой дугой и свариваемые кромки следует тщательно зачистить от ржавчины и окалины. Ее обычно используют при монтаже котлов и паропроводов и сварке труб поверхностей нагрева к коллекторам, а также при сварке литых деталей турбин и заварке дефектов в отливках.

В зависимости от условий работы конструкции подбирается тот или иной тип, марка электрода и вид термообработки после сварки. Так, для ручной сварки стали 12МХ можно рекомендовать электроды типа Э-09МХ, марки ЦУ-2МХ, термообработка после сварки — отпуск; для стали марок 15ХМ, 20ХМЛ — электроды типа Э-09Х1М марок ЦУ-2ХМ, ЦЛ-38, ЗИО-20, УОНИ-13ХМ, термообработка — отпуск; для сталей марок 12Х1МФ, 15Х1М1Ф — электроды типа Э-09Х1МФ, марок ЦЛ-20, ЦЛ-45, ЦЛ-39, термообработка — отпуск; для сталей марок 20ХМФ-Л, 15Х1М1Ф-Л электроды типа Э-10Х1М1НФБ, марки ЦЛ-36, термообработка сталей — нормализация и отпуск.

Для уменьшения вероятности образования кристаллизационных трещин, а также карбидов, обуславливающего расход легирующих элементов, упрочняющих феррит, содержание углерода в металле, наплавленном ранее

указанными электродами, не должно превышать 0,13 %. При изготовлении некоторых конструкций из листовой стали малых толщин сварка может производиться без подогрева, а при толщине более 6 мм — с предварительным и сопутствующим подогревом. Сварку многослойных длинных швов следует выполнять каскадным или блочным методом (см. рис. 97).

При сварке трубчатых элементов с толщиной стенок более 6 мм и содержанием углерода более 0,18 % обязательным является предварительный и сопутствующий подогрев с таким расчетом, чтобы температура металла труб в зоне, прилегающей ко шву, во время сварки была не ниже 200 °С. Заварка стыков, как правило, должна выполняться без перерывов. Если имел место вынужденный перерыв, то надо обеспечить равномерное и медленное остывание, а перед возобновлением сварки снова нагреть детали до необходимой температуры.

Ручную сварку покрытыми электродами применяют при монтаже котлов и паропроводов, а в заводских условиях при изготовлении тройников, сварке блоков трубопроводов и приварке труб поверхностей нагрева к коллекторам, а также при сварке литых деталей турбин и заварке дефектов отливок.

Сварка в углекислом газе теплоустойчивых сталей позволяет значительно расширить объем применения механизированных способов сварки в энергомашиностроении. При сварке в углекислом газе сталей марок 15ХМ, 20ХМЛ применяется сварочная проволока Св-10ХГСМА, что обеспечивает равнопрочность сварного соединения с основным металлом по всем показателям. Для сварки в углекислом газе сталей марок 12Х1МФ, 20ХМФЛ применяется сварочная проволока Св-08ХГСМФА. Но в общих случаях сварка должна производиться с предварительным и сопутствующим подогревом (см. табл. 40). Режимы сварки практически не отличаются от режимов сварки низколегированной стали.

Состав защитного газа существенно влияет на технологические характеристики процесса. Так, в CO_2 , $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ (менее 15 % O_2), $\text{Ar} + \text{CO}_2$ (более 20 % CO_2) и $\text{Ar} + \text{O}_2 + \text{CO}_2$ (более 20 % CO_2) можно выполнять сварку во всех пространственных положениях. Смеси $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ (более 20 % O_2), $\text{Ar} + \text{CO}_2$ (менее 18 % CO_2) и $\text{Ar} + \text{O}_2 + \text{CO}_2$ (менее 18 % CO_2) пригодны для сварки стационарной дугой в нижнем положении. При сварке в $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ и $\text{Ar} + \text{CO}_2$

(более 20 % CO_2) на всех режимах и в смесях $\text{Ar} + \text{O}_2 + \text{CO}_2$ (менее 15 % CO_2) на токах менее критических значений форма провара треугольная.

Автоматическая сварка под флюсом. Эта сварка производится легированными проволоками с применением малоактивных флюсов АН-22, ФЦ-11 с пониженным содержанием оксидов марганца и кремния. Это обеспечивает высокие пластические свойства швов и стабильность состава многослойных швов по содержанию в них марганца и кремния. Так, при сварке сталей 12ХМ, 15ХМ, 20ХМЛ под флюсом АН-22, ФЦ-11 рекомендуется применять проволоку Св-08МХ, сталей 12Х1МФ, 15Х1М1Ф под флюсом АН-22 — проволоку Св-08ХМФА, а сталей 20ХМФЛ, 15Х1М1ФЛ под флюсом АН-22 — проволоку Св-14Х1М1ФА.

Автоматическую сварку под флюсом применяют при сварке паропроводов и приварке доннышек к коллекторам в заводских условиях. Аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом в ряде случаев выполняется без присадочной проволоки, а когда необходима присадочная проволока для некоторых марок сталей рекомендуется проволока:

Марка стали . . . 12МХ	15ХМ; 20ХМЛ	20ХМФЛ
Марка проволоки Св-08МХ	Св-08ХМФА	Св-14Х1М1ФА
Марка стали . . . 15Х1М1ФЛ	12Х2МФСР	15Х2МФБ
Марка проволоки Св-14Х1М1ФА	Св-08ХМФА	Св-08ХГСМФА

Аргонодуговую сварку вольфрамовым электродом в аргоне, а иногда и смеси газов применяют как в заводских, так и в монтажных условиях при сварке корневых слоев кольцевых труб поверхностей нагрева котлов и паропроводов, когда сварка стыков осуществляется без подкладных колец.

После окончания сварки конструкция подвергается отпуску по режиму: посадка в печь при температуре 300 °С, нагрев до 680 °С со скоростью 40—50 °С в час, выдержка при температуре 640—680 °С в продолжении 4 ч. Охлаждение до 200 °С со скоростью 40—50 °С и с последующим остыванием на воздухе. Следует отметить, что сварка в среде CO_2 теплоустойчивых сталей имеет ряд преимуществ перед сваркой под флюсом и ручной. Так, при одинаковом химическом составе, швы, выполненные в среде CO_2 , имеют более высокие показатели длительной прочности. Объясняется это тем, что швы, выполненные под флюсом, а также толстопокрытыми электродами, со-

держат значительно большее количество шлаковых включений, чем швы, выполненные в среде CO_2 , а производительность сварки в среде CO_2 в 2,5—3,0 раза выше производительности ручной сварки электродами марки ЦЛ-20А.

Сварка легированных сталей

Легированные конструкционные стали с содержанием углерода до 0,5 % поставляются в основном по ГОСТ 4543—71, где они подразделяются по категориям: качественная, высококачественная — А; особовысококачественная — Ш.

Легированные термоустойчивые стали обычно содержат не более 0,25 % С и до 6 % Сг и могут быть легированы Мо, V, W и Nb. Легированные стали обладают высокими механическими свойствами, что обеспечивается легированием элементами, упрочняющими феррит и повышающими прокаливаемость стали при соответствующей термической обработке. Легированные стали, предназначенные для изготовления сварных конструкций, обычно подвергаются термической обработке. При высоких прочностных свойствах ($\sigma_b = 0,6 \div 2,0$ МПа/мм²) легированные стали после соответствующей термической обработки по пластичности и вязкости превосходят низкоуглеродистую сталь, обладая при этом высокой стойкостью против перехода в хрупкое состояние.

Эти стали используются для создания облегченных высокопрочных конструкций в ряде отраслей народного хозяйства. Данные по некоторым легированным сталям приведены в табл. 38. Повышение содержания углерода в этих сталях и введение легирующих элементов значительно затормаживают распад аустенита при охлаждении; температура его распада заметно снижается, а в ряде случаев в качестве конечных структур появляется мартенсит.

Склонность стали к получению закаленных структур при распаде аустенита может характеризоваться диаграммами изотермического распада аустенита, приведенными на рис. 137, в котором по вертикальной оси отложена температура, а по горизонтальной — время выдержки при данной температуре (логарифмическая шкала). На С-образные кривые в том же масштабе наложены кривые различных скоростей охлаждения 1—5.

Температура T_{min} называется температурой наименьшей устойчивости аустенита при распаде в изотермиче-

ских условиях. Для различных сталей она лежит в пределах 450—650 °С, а для большинства сталей $T_{min} = 550$ °С. Продолжительность инкубационного периода начала распада аустенита при T_{min} минимальна. Чем больше этот период, тем вероятнее получение мартенсита. Вид кривых изотермического распада аустенита и их расположение на диаграмме зависит от химического состава стали. Все легирующие элементы сдвигают кривые изотермического распада вправо, т. е. увеличивают период его распада.

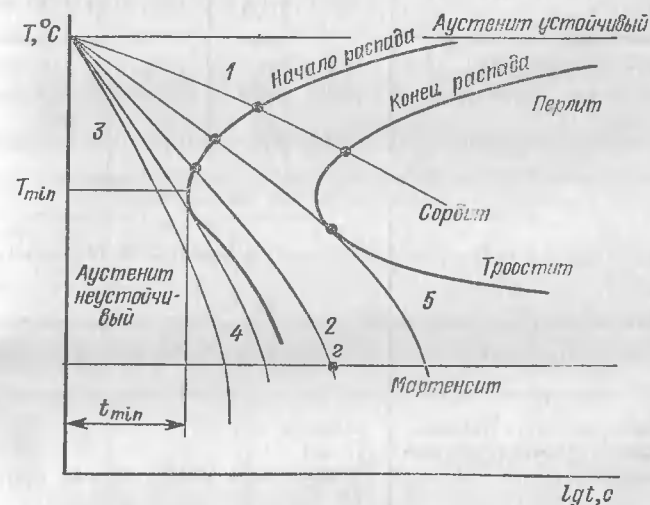


Рис. 137. Схема для оценки конечных структур металла по кривым устойчивости аустенита и скорости охлаждения (кривые 1—5)

Пользуясь диаграммами изотермического распада аустенита, можно установить скорость охлаждения, обеспечивающую наличие или отсутствие в металле тех или иных структурных составляющих. При сварке закалывающихся легированных сталей обычно стараются обеспечить пластичный металл околошовной зоны.

Расчет скорости охлаждения при сварке. Если кривой 4 (см. рис. 137) представить ту минимальную скорость охлаждения $v_{охл1}$, при которой структура будет получаться полностью мартенситной, а кривой 5 — минимальную скорость охлаждения $v_{охл2}$, при которой мартенсит будет

Таблица 38. Химический состав и механические свойства неко-

Группа сталей	Марка сталей	Массовое		
		C	Mn	
Хромомолибденовая	35ХМ	0,32—0,40	0,40—0,70	
Хромокремнемарганцевая и хромокремнемарганцево-никелевая	20ХГСА	0,17—0,23	0,80—1,10	
	30ХГСА	0,28—0,34	0,80—1,10	
	30ХГСН2А	0,28—0,34	1,00—1,30	
Хромоникельмолибденовая Хромоникельмолибденова- надиевая	30ХН2МА	0,27—0,34	0,30—0,60	
	30ХН2МФА	0,27—0,34	0,30—0,60	
Хромоникельванадиевая	20ХН4ФА	0,17—0,24	0,25—0,55	
Группа сталей	Вид термической обработки			
Хромомолибденовая	Закалка при 850 °С; отпуск при 560 °С			
Хромокремнемарганцевая и хромокремнемарганцево-никелевая	Закалка; отпуск То же			
	Закалка при 900 °С; отпуск при 200—300 °С			
Хромоникельмолибденовая Хромоникельмолибденова- надиевая	Закалка; отпуск при 580 °С То же, при 680 °С			
	То же, при 630 °С			

полностью исключен, то эти скорости охлаждения приближенно могут быть вычислены по формулам:

$$v_{\text{охл } 1} = \frac{T_1 - (T_{\text{min}} - 55)}{2 \cdot 1,5 t_{\text{min}}}; \quad (137)$$

$$v_{\text{охл } 2} = \frac{T_1 - 350}{2 \cdot 1,5 t_{\text{min}}}, \quad (138)$$

где $v_{\text{охл}}$ — скорость охлаждения, °С/с; T_1 — температура, соответствующая точке A_{c1} , °С; t_{min} — минимальная про-

торых легированных конструкционных сталей

содержание основных элементов, %				
Si	Cr	Ni	Mo	V
0,17—0,37	0,80—1,10		0,15—0,25	—
0,90—1,20 0,90—1,20 0,90—1,20	0,80—1,10 0,80—1,10 0,90—1,20	1,40—1,80	—	—
0,17—0,37 0,17—0,37	0,60—0,90 0,60—0,90	1,25—1,65 2,00—2,40	0,20—0,30 0,20—0,30	0,10—0,18
0,17—0,37	0,70—1,10	3,75—4,15	—	0,10—0,18
Механические свойства				KCU, Дж/см ²
σ _B	σ _T	δ	ψ	
МПа/мм ²		%		
не менее				
950	850	12	45	
800 1100 1650	650 850 1400	12 10 9	45 45 45	70 50 60
1000 900 900	800 800 700	10 10 12	45 40 50	80 90 100

должительность полного распада аустенита при непрерывном охлаждении.

Температура 350 °С в формуле принята как наиболее характерная для мартенситной точки большинства конструкционных закаливающихся сталей. Поправка к T_{min} в 55 °С в формуле (137) является обычной для многих сталей, как характеристика снижения T_{min} при непрерывном охлаждении по сравнению с T_{min} при изотермическом распаде. Поправочный коэффициент 2 в этой формуле учи-

тывает рост зерна аустенита, соответствующий сварочному нагреву, а 1,5 вводит поправку на непрерывность охлаждения.

Таким образом, если известна характеристика данной стали, то по формуле (13) можно подсчитать критические скорости охлаждения, обеспечивающие в околошовной зоне отсутствие закаленных структур.

Ранее уже было установлено, что погонная энергия оказывает влияние на основной металл (см. рис. 61). Однако скорость охлаждения в условиях сварки является решающим фактором в формировании конечных структур и

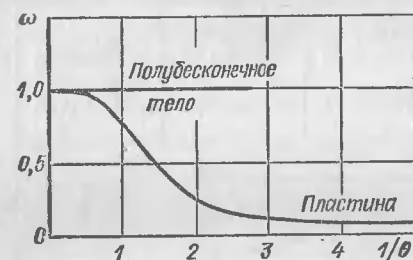


Рис. 138. График зависимости безразмерных величин ω и $1/\theta$

свойств околошовной зоны, особенно при сварке закаливающихся сталей. Поэтому регулирование скорости охлаждения при сварке имеет большое значение.

Теория распределения теплоты при сварке позволяет рассчитать скорость охлаждения металла в сварном соединении по уравнениям:

1) при наплавке валика на полубесконечное тело

$$v_{\text{охл}} = 2\pi\lambda \frac{(T_{\text{min}} - T_0)^2}{Q_{\text{эф}}/v}; \quad (139)$$

2) при сварке пластин

$$v_{\text{охл}} = 2\pi\lambda c\gamma \frac{(T_{\text{min}} - T_0)^3}{(Q_{\text{эф}}/vs)^2}; \quad (140)$$

3) при наплавке валика на лист любой толщины

$$v_{\text{охл}} = \omega \frac{2\pi\lambda (T_{\text{min}} - T_0)^2}{Q_{\text{эф}}/v}, \quad (141)$$

где T_0 — начальная температура свариваемого изделия, °С; ω — безразмерная величина процесса охлаждения, которая также зависит от свойств свариваемого металла и условий сварки и определяется через другую безразмерную величину $1/\theta$ по формулам (142) и (143), а взаимосвязь обеих величин показана на рис. 138:

$$\frac{1}{\theta} = \frac{2Q_{\text{эф}}/v}{\pi s^2 c\gamma (T_{\text{min}} - T_0)}; \quad (142)$$

$$\omega = \frac{v_{\text{охл}} Q_{\text{эф}}/v}{2\pi\lambda (T_{\text{min}} - T_0)^2}. \quad (143)$$

Формулы (139) и (141) приведены для случая наплавки валика на поверхность изделия и односторонней сварки встык, поэтому при сварке многосторонних швов встык, тавровых или нахлесточных швов, чтобы приблизить расчетную схему к фактически действующей рекомендуется в расчетные формулы вводить поправочные коэффициенты (табл. 39).

При сварке легированных сталей, склонных к закалке, металл околошовной зоны в результате быстрого охлаждения приобретает структуру закали. При этом

конечная структура каждого участка зоны термического влияния будет зависеть от свойств металла, погонной энергии и размеров изделия, влияющих на скорость охлаждения при сварке. Структура участков может быть получена либо полностью мартенситной, либо со смешанной структурой с тем или иным количеством более стабильных продуктов распада аустенита, поэтому в зоне термического влияния сварных соединений закаливающих сталей в процессе охлаждения или через некоторое время после полного остывания образуются холодные трещины.

Для предотвращения образования трещин приходится усложнять технологический процесс. Одним из наиболее действенных приемов является подогрев изделия. Сварка производится предпочтительно с общим предварительным и сопутствующим подогревом или только сопутствующим подогревом.

Эксплуатационная надежность конструкций из металла повышенной толщины может быть обеспечена лишь после стабилизации структуры и снятия напряжений путем отпуска сварных соединений. При этом температура отпуска сварных соединений хромомолибденованадиевых сталей должна быть не ниже 700 °С, так как выпадение дисперсных карбидов ванадия из твердого раствора при низких температурах отпуска приводит к охрупчиванию

Таблица 39. Поправочные коэффициенты, учитывающие влияние конструкции соединения

Приводимая величина	Поправочный коэффициент		
	при наплавке односторонней сварке встык	при сварке 1-го прохода стыка с разделкой 60°	при сварке 1-го слоя впритык или внахлестку
$Q_{\text{эф}}/v$	1 1	3/2 3/2	2/3 1

металла околошовной зоны и возникновению местных разрушений сварных соединений при отпуске или в процессе эксплуатации конструкций.

Подогрев при сварке

Сопутствующий сварке местный или общий нагрев изделия является надежным средством предотвращения холодных трещин, так как уменьшает разницу температур металла в зоне сварки и на рядом расположенных участках, что снижает напряжение первого рода.

Таблица 40. Температура предварительного и сопутствующего подогрева в зависимости от толщины и марки стали

Марка стали	Толщина свариваемого изделия (мм) и температура подогрева, °C	
	7—30	выше 30
12МХ 15ХМ 20ХМ—Л	— 150—200 200—250	150—200 200—250 250—300
12Х1МФ	250—300	300—350
15Х1М1Ф 20ХМФ—Л 15Х1М1Ф—Л	300—350 300—400 —	(для всех толщин)
Х5МФ	350—400 (для толщин до 30 мм)	400—450

только нижний, но и верхний предел температуры подогрева. Излишне высокие температуры подогрева приводят к распаду аустенита в высокотемпературной области с образованием грубой ферритно-перлитной структуры, не обеспечивающей длительной прочности и необходимой ударной вязкости сварных соединений.

Рекомендуемые пределы изменения температур предварительного и сопутствующего подогрева некоторых теплоустойчивых сталей в зависимости от толщины свариваемых изделий приведены в табл. 40.

Подогрев также уменьшает скорость охлаждения металла, что предотвращает превращение аустенита в мартенсит, которое сопровождается резким увеличением удельного объема металла, вызывающего появление напряжений второго рода. Нагрев уменьшает вероятность появления холодных трещин, так как повышает пластичность и, следовательно, деформационную способность металла.

При сварке теплоустойчивых сталей необходимо ограничить не

Сопутствующий подогрев осуществляется газовым пламенем небольшой мощности, или индуктором, располагаемым на определенном расстоянии за сварочной дугой и перемещающимся со скоростью сварки, что увеличивает время пребывания каждого элементарного объема металла околошовной зоны в диапазоне температур превращения аустенита, что, в свою очередь, приводит к заметному повышению структурной однородности сварного соединения и его конструктивной прочности. Сопутствующий индуктивный подогрев сварного соединения является более эффективным, так как позволяет в широких пределах и с большей точностью регулировать параметры термического цикла.

Подогрев снижает скорость охлаждения в области температур распада аустенита, что может быть рассчитано по формулам (142)—(143), где T_0 соответствует температуре подогрева.

Эквивалент углерода и температура предварительного подогрева стали

Чем больше склонность стали к полной закалке и чем менее пластичной получается структура металла, тем вероятнее образование трещин в околошовной зоне и тем выше должна быть температура предварительного подогрева перед сваркой.

Основным элементом, увеличивающим закаливаемость и прокаливаемость сталей, является углерод. Влияние других легирующих элементов, снижающих скорость распада аустенита, может быть оценено пересчетом их содержания в стали в эквивалентно действующее количество углерода. Для пересчета каждого элемента в эквивалентное количество углерода подбирают соответствующие коэффициенты, приведенные в формуле

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cr}{5} + \frac{V}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Ni}{10} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2}, \quad (141)$$

где содержание элементов дано в процентах, причем содержание меди учитывается при $Cu \geq 0,5 \%$, а фосфора при $P \geq 0,05 \%$. Если при подсчете эквивалента углерода окажется, что $C_e < 0,35 \%$, то данная сталь может свариваться без подогрева, а при сварке металла относительно небольшой толщины (по 6—8 мм) предельное значение C_e ,

при котором не требуется предварительного подогрева, может составить 0,45—0,50 %. Если же требуется сваривать сталь по толщине более 8 мм и $C_s > 0,35$ %, то необходим предварительный подогрев тем более высокий, чем выше C_s . В то же время следует отметить, что оценка закаливаемости стали при условиях сварки по эквиваленту углерода является весьма приближенной, так как в формуле (144) не указывается толщина металла, способ сварки и др. Поэтому была предложена другая эмпирическая формула для расчета эквивалента углерода, связанная не только с химическим составом свариваемой стали, но и с ее толщиной. При этом эквивалент углерода, связанный с химическим составом, определяется по формуле

$$C_s = C + \frac{1}{9} (Mn + Cr) + \frac{1}{18} Ni + \frac{1}{13} Mo, \quad (145)$$

а влияние толщины свариваемого металла учитывается поправкой к эквиваленту углерода C_s , найденному только с учетом химического состава по формуле

$$N = 0,005sC_s, \quad (146)$$

где N — поправка к эквиваленту углерода; s — толщина свариваемого металла; 0,005 — коэффициент толщины, определенный опытным путем.

Тогда полный эквивалент углерода составит

$$C'_s = C_s + N = C_s + 0,005sC_s = C_s (1 + 0,005s). \quad (147)$$

В этом случае температура предварительного подогрева $T_{\text{под}}$ свариваемых деталей определяется по формуле

$$T_{\text{под}} = 350 \sqrt{C'_s - 0,25}. \quad (148)$$

Пример. Определить, требуется ли подогрев при сварке встык двух деталей толщиной 20 мм из стали 25ХЗНМ следующего химического состава: 0,25 % С; 0,6 % Мп; 0,3 % Si; 4 % Cr; 1,5 % Ni; 0,3 % Мо.

1. Определяем эквивалент углерода по формуле (145)

$$C_s = 0,25 + 0,51 + 0,08 + 0,02 = 0,86.$$

2. Определяем полный эквивалент углерода с учетом влияния толщины

$$C'_s = C_s (1 + 0,005s) = 0,86 (1 + 0,005 \cdot 20) = 0,95.$$

3. При таком эквиваленте углерода подогрев необходим. Определяем температуру предварительного подогрева

$$T_{\text{под}} = 350 \sqrt{0,95 - 0,25} = 294^\circ \text{C}.$$

В ряде случаев, чтобы избежать предварительного подогрева при сварке низколегированных сталей повышенной прочности с большим эквивалентом углерода ($C'_s = 0,70$ %), сварку производят низкоуглеродистыми электродами по специальной технологии.

Применение электрошлаковой сварки, характеризующейся большим вводом теплоты и небольшой скоростью охлаждения шва и зоны термического влияния, позволяет сваривать без подогрева закаливающиеся стали с большим эквивалентом углерода.

Дополнительные трудности при сварке легированных сталей возникают еще и потому, что в связи с переходом углерода и легирующих элементов из основного металла в металл шва последний имеет более низкую стойкость против кристаллизационных трещин. Особенно это проявляется при сварке металла больших толщин встык и угловых швов с большой долей участия основного металла в металле шва. Чтобы уменьшить вероятность образования горячих трещин, приходится создавать швы с пониженным против основного металла содержанием углерода. Для получения при этом высоких механических свойств прибегают к дополнительному легированию металла шва элементами (Мп, Cr, Ti), повышающими прочность и стойкость металла против кристаллизационных трещин. Примером такого решения является использование для сварки стали 30ХГСА электродной проволоки марки СВ-08ХЗГ2СМ. Доля участия основного металла в металле шва регулируется соответствующим подбором режима сварки. При этом необходимо избегать узкой и глубокой разделки кромок под сварку, подбирая режим особенно при сварке первого прохода стыкового шва, обеспечивающий получение коэффициента формы провара не менее 1,3.

§ 43. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ СРЕДНЕЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Сварка толстопокрытыми электродами

Для ручной сварки легированных сталей рекомендуется применять электроды с основным покрытием. Выполнять сварку следует на постоянном токе обратной полярности с проходами максимального допустимого сечения, а при больших толщинах — каскадным или блочным методом.

Для сварки легированных сталей повышенной прочности часто применяются стержни из аустенитных сталей с покрытием основного вида. Стержни этих электродов изготавливаются из проволоки марок Св-10Х20Н15, Св-08Х21Н10Г6 и др.

Сварка под флюсом

Сварка под флюсом обеспечивает высокую производительность процесса особенно в тех случаях, когда сварка производится в один проход. Во всех случаях, когда соединение обладает достаточно высокой стойкостью против трещин и подвергается после сварки термической обработке, однопроходную сварку легированных сталей можно производить с использованием режимов, применяемых при сварке низколегированных сталей.

При сварке под флюсом соединений, не подвергающихся после сварки термической обработке, сварку следует производить на пониженных режимах постоянным током обратной полярности.

Сталь 30ХГСА толщиной до 6 мм может свариваться без предварительного подогрева. А при толщине металла 10 мм, особенно при наличии жесткого закрепления, эта сталь сваривается с предварительным подогревом до температуры 250—300 °С. Для сварки стали 30ХГСА может применяться сварочная проволока Св-18ХМА и флюс АН-10 или АН-22, но лучшие результаты получаются при применении сварочной проволоки Св-08Х3Г2СМ или Св-13Х2МТФ.

Сварка в среде CO₂

При однопроходной сварке в среде CO₂ стали 30ХГСА толщиной до 6 мм с полным проваром металл шва легируется углеродом, хромом и марганцем за счет основного металла. Поэтому в данном случае может быть использована сварочная проволока марок Св-18ХМА, Св-08ХГ2С и Св-08Г2С. После отпуска при температуре 560—660 °С такие сварные соединения обладают равнопрочностью и удовлетворительной пластичностью.

Для многопроходной сварки в среде CO₂ стали 30ХГСА рекомендуется сварочная проволока более легированная, с меньшим содержанием углерода — Св-08Х3Г2СМ. Сварные швы после соответствующей термической обра-

ботки имеют: $\sigma_b = 1140 \div 1230$ МПа/мм², $\sigma_T = 910 \div 1050$ МПа/мм², $\delta = 12 \div 14$ %, $KCU = 20 \div 60$ Дж/см², т. е. показатели более высокие, чем основной металл (см. табл. 38).

Металл толщиной до 6 мм можно сваривать без предварительного подогрева, но с обязательным последующим отпуском сразу же после сварки. При большей толщине металла и жесткости изделия необходим подогрев до температуры 200—300 °С. Часто первые проходы многопроходных швов на среднелегированных сталях выполняют в среде аргона.

Электрошлаковая сварка

Высокие механические свойства среднелегированных сталей и их восприимчивость к закалке создают значительные трудности при дуговой сварке. Это связано с низкой утойчивостью к образованию горячих трещин в шве и холодных трещин в шве и в зоне термического влияния, а также со сложностью получения равноправных соединений.

При электрошлаковой сварке многие из указанных трудностей в значительной мере ослаблены. Замедленное охлаждение соединений в интервале температур промежуточного и мартенситного превращения аустенита заметно снижает опасность образования холодных трещин. Большой коэффициент формы металлической ванны позволяет использовать сварочные проволоки или пластины с повышенным легированием и получать равнопрочные швы с основным металлом, сохраняя при этом достаточно высокую устойчивость его к образованию горячих трещин.

Применение электрошлаковой сварки низколегированных сталей с повышенным содержанием углерода и среднелегированных глубоко прокаливающих сталей наиболее рационально для соединения толстолистовых конструкций. Выбор присадочных материалов для сварки среднелегированных сталей зависит от предъявляемых к металлу шва требований. Если необходимо получить равнопрочное соединение, применяют среднелегированные стандартные электродные проволоки Св-08ХН2М, Св-08Х3Т2СМ, Св-13Х2МТФ, или проволоки и пластины аналогичного с основным металлом состава.

В тех случаях, когда требования к прочности шва менее жесткие (зачастую на 10 % ниже чем для основного

30

металла), можно применять низколегированную проволоку марок Св-10Г2, Св-08ГСМТ, Св-08ХГ2СМ и выполнять швы с большим проваром кромок. Повышенное содержание основного металла в металле шва (до 60 %) сообщает последнему легирование, достаточное для получения требуемых прочностных свойств.

Электрошлаковую сварку среднелегированных сталей выполняют под флюсами АН-8, 48-ОФ-6 и АНФ-6. Два последних флюса предпочтительнее, когда необходимо получить металл шва, идентичный основному металлу или повысить стойкость шва против хрупких разрушений и кристаллизационных трещин. Эти флюсы применяют при сварке высокопрочных среднелегированных сталей с временным сопротивлением (до 1800 МПа/мм²), высокой ударной вязкостью, а также при изготовлении сварных конструкций повышенной жесткости.

Среднелегированные стали деформируются в процессе сварки в большей степени, чем низколегированные. Это необходимо учитывать при определении сборочных зазоров по длине стыка. Для предотвращения кристаллизационных трещин в металле шва сварку среднелегированных сталей выполняют с более низкими скоростями подачи электродов (обычно не более 220 м/ч при диаметре проволоки 3 мм), что равнозначно уменьшению силы сварного тока (127). При изготовлении жестких конструкций скорость подачи электродов еще более снижают.

Для предупреждения холодных трещин в сварных соединениях толстостенных жестких изделий обычно прибегают к предварительному (в печи) и сопутствующим подогревам. Так, для сварки конструкций из стали марок 20ХНМФ, 20Х2МА, 25Х2ГМТ, характеризующихся повышенным эквивалентным содержанием углерода, температура предварительного подогрева при толщине свариваемого металла менее 250 мм составляет обычно 150—200 °С, сопутствующего — 150 °С.

При сварке металла толщиной свыше 250 мм температуру предварительного нагрева повышают до 200—250 °С, сопутствующего — до 200 °С. Конструкции из стали марок 25ХНЗМФ и 35ХЗМФ толщиной 750—1800 мм нагревают в печи перед сваркой до 500 °С. Применяя сопутствующий подогрев, соединению не позволяют охладиться в районе шва ниже температуры 300—350 °С. Таким образом предупреждается мартенситное превращение аустенита в зоне термического влияния и повышается устойчи-

Т а б л и ц а 41. Режимы электрошлаковой сварки, вид термообработки и свойства некоторых среднелегированных сталей

Марка стали	Толщина, мм	Присадочный металл	Флюс	Основные параметры режима	Термообработка	σ_T		σ_B	δ_n	ψ		КСУ	
						МПа/мм ²				%	Дж/см ²		
20Х2МА	120	Св-08ХГ2СМ	АН-8	$n = 2;$ $I_{св} = 450 \div 500 \text{ А},$ $U_{св} = 44 \div 48 \text{ В},$ $v_{п.з} = 200 \div 240 \text{ м/ч}$	Нормализация при 910 °С и отпуск при 650 °С	540	660		18	70		100	
20ХНМФ	1000	Св-08ХН2М; 20ХНМФ	АН-348	$n = 10;$ $U_{св} = 54 \text{ В};$ $v_{п.з} = 140 \div 150 \text{ м/ч}$	Нормализация при 920 °С и отпуск при 640 °С	670	840		15	33		45	
15Х2МФА	650	Св-13Х2МФТ 15Х2МФ	48-ОФ-6	$n = 8;$ $U_{св} = 40 \div 42 \text{ В};$ $v_{п.з} = 110 \div 130 \text{ м/ч}$	Закалка при 1000 °С и отпуск при 700 °С	540	650		18	73		200	
30Х2ГСНВМА	50	20Х2ГСНВМА	АН-8	$n = 1;$ $I_{св} = 500 \div 550 \text{ А};$ $U_{св} = 44 \div 46 \text{ В}$	Закалка при 940 °С и низкий отпуск при 210 °С	—	1700		9	36		50	

* $v_{п.з}$ — скорость подачи электродов.

* $v_{п.з}$ — скорость подачи электродов.

чивость соединений к образованию холодных трещин.

Для нежестких конструкций небольшой толщины, например продольных швов цилиндрических обечаек, предварительного подогрева в печи обычно не применяют. Во многих случаях можно ограничиться предварительным подогревом начального и конечного участков шва. При этом после завершения сварки допускается подогревать шов до 150—200 °С до момента загрузки изделия в печь на отпуск с целью снятия напряжений от сварки. Промежуточный отпуск после окончания электрошлаковой сварки предусматривают для большинства среднелегированных сталей. Для толстостенных конструкций повышенной жесткости отпуск необходим непосредственно после завершения сварки, при этом температура изделия до посадки в печь не должна быть ниже установленных температур предварительного нагрева.

Для придания сварным конструкциям требуемых свойств их подвергают окончательной термической термообработке — нормализации или закалке с отпуском по режимам, принятым для основного металла.

В табл. 41 приведены режимы электрошлаковой сварки, вид термообработки и свойства металла шва для некоторых среднелегированных сталей.

Сварка глубокопрокаливающихся машиностроительных сталей

Эти стали характерны тем, что углерод в сочетании с другими входящими в них легирующими элементами способствует значительному понижению критической скорости охлаждения, вследствие чего под воздействием термического цикла сварки в околошовной зоне образуется закаленный участок с очень низкими пластическими свойствами. Кроме того, благодаря легированию стали элементами, повышающими устойчивость аустенита, образование мартенсита в околошовной зоне происходит при довольно низких температурах. Если стыковое соединение из такой стали сварить электродами, которые после охлаждения образуют структуру перлита, то при охлаждении такого шва в момент аллотропических превращений (перехода γ -железа в α -железо) при температуре 680—700 °С будет наблюдаться резкое уменьшение растворимости водорода в наплавленном металле. Избыточный

водород будет выделяться из металла шва во всех направлениях, в том числе и в околошовную зону, где еще сохраняется структура аустенита.

Как видно из графика (см. рис. 52) и табл. 42, растворимость водорода в твердом металле зависит от температуры и структурного состояния.

От этих же факторов зависит и диффузионная способность водорода. Если фазовые превращения в металле шва и околошовной зоне происходят неодновременно, как это имеет место в рассмотренном случае, водород из ме-

Таблица 42. Растворимость и проникающая способность водорода в α - и β -железе

Температура, °С	Растворимость водорода, см ³ /100 г металла		Проницаемость, см ² /мм ² ·ч	
	γ -Fe	α -Fe	γ -Fe	α -Fe
500	4,0	0,75	$18 \cdot 10^{-2}$	$26 \cdot 10^{-2}$
100	0,9	0,2	$34 \cdot 10^{-9}$	$26 \cdot 10^{-9}$

талла шва устремляется в околошовную зону, которая сохранила еще аустенитную структуру. Вследствие его большой растворимости в аустените и меньшей проницаемости, водород накапливается в переходной зоне, уменьшает пластические свойства этого участка, увеличивает внутренние напряжения, которые вместе со структурными и тепловыми напряжениями приводят к трещинообразованию. Поэтому для сварки легированных сталей этой группы применяют электроды из аустенитной стали, что значительно снижает действие факторов, вызывающих трещинообразование, так как аустенит обладает высокой пластичностью, не претерпевает фазовых превращений и растворимость водорода в нем с изменением температуры изменяется незначительно.

В качестве электродного стержня применяют сварочную проволоку марок Св-10Х20Н15 и Св-08Х21Н10Г6 с покрытием основного вида, рекомендуемым для аустенитных электродов.

Для сварки изделий из рассматриваемой стали можно рекомендовать следующую укрупненную технологию. Сначала на подготовленные кромки деталей производят наплавку слоя аустенитными электродами, затем — термообработку деталей, чтобы устранить участок закаленной

структуры в зоне термического влияния. После этого детали собираются по наплавленным кромкам и свариваются аустенитными электродами на соответствующих режимах. При этом основной металл не подвергается нагреву до температур, при которых наблюдаются структурные превращения, и соединение получается вполне работоспособным.

Основными мерами борьбы с холодными трещинами при сварке сталей повышенной прочности являются подогрев свариваемых изделий, применение низководородных электродных покрытий и флюсов, электродной проволоки с пониженным содержанием углерода, легированной карбидообразующими элементами, или аустенитных электродов.

При сварке изделий с жесткими элементами в промежутках между сваркой отдельных жестких элементов производится еще дополнительный отпуск или отжиг, а также после окончания сварки изделия.

§ 44. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Высоколегированные стали и сплавы применяются в промышленности для изготовления изделий, имеющих высокую стойкость к атмосферной и газовой коррозии, кислотостойкость, окислительную стойкость и жаропрочность.

В соответствии с ГОСТ 5632—72 стали и сплавы в зависимости от основных свойств делятся на следующие группы:

1) коррозионно-стойкие стали и сплавы, к которым относятся стали, обладающие стойкостью против электрохимической и химической коррозии (атмосферной, почвенной, щелочной, кислотной, межкристаллитной коррозии и др.);

2) жаростойкие (окислительные) стали и сплавы, к которым относятся стали и сплавы, обладающие стойкостью против химического разрушения поверхности в газовых средах при температурах выше 550 °С, работающие в ненагруженном или слабо нагруженном состоянии;

3) жаропрочные стали и сплавы, работающие в нагруженном состоянии при высоких температурах.

Химический состав некоторых высоколегированных сталей и их подразделение по видам структуры приведены в табл. 43. В зависимости от структуры стали подразде-

ляют на следующие классы: мартенситные — стали с основной структурой мартенсита; мартенситно-ферритные — стали, содержащие в структуре кроме мартенсита не менее 10 % феррита; ферритные — стали со структурой феррита (без $L\alpha \rightleftharpoons \gamma$ превращений); аустенитно-мартенситные — стали со структурой аустенита и мартенсита; аустенитно-ферритные — стали со структурой аустенита и феррита (феррита более 10 %); аустенитные — стали, имеющие структуру аустенита.

Влияние легированных элементов на структуру сварных швов может быть установлено по диаграмме Шеффлера (см. рис. 67). Эту же диаграмму можно использовать для ориентировочного определения структуры стали. Высоколегированные стали и сплавы нашли широкое применение в различных отраслях народного хозяйства благодаря ряду ценных свойств: достаточной длительной прочности и сопротивлению ползучести, стабильности, физическим, химическим и механическим характеристикам при длительном воздействии высоких температур и нагрузок, повышенной жаростойкости и коррозионной стойкости.

Сварка хромистых сталей

По диаграмме состояния сплавов железо—хром (рис. 139) видно, что увеличение содержания хрома в стали способствует сужению аустенитной γ -области и расширению ферритной α -области. При содержании хрома более 13 % γ -область не существует, и при всех температурах сплав сохраняет структуру α -области, т. е. феррита. Но если в сплав будут введены элементы, расширяющие γ -область, т. е. аустенитообразователи, то сплав сможет сохранить структуру феррита только при большем содержании хрома.

На рис. 140 приведена диаграмма, характеризующая влияние углерода на γ -область, из которой следует, что при содержании углерода 0,15 % потребуются 18 % хрома, чтобы получить однофазную ферритную структуру.

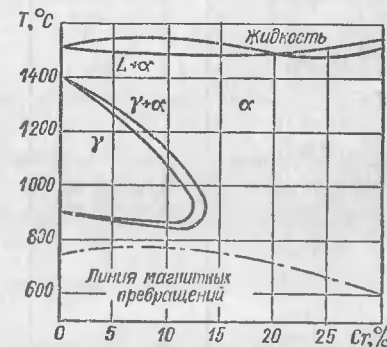


Рис. 139. Диаграмма состояния сплава Fe—Cr

Таблица 43. Химический состав некоторых высоколегирован

Марка по ГОСТу 5632—72	Марка стали	Массовое содер		
		C	Si	Mn
1—12	20X13	0,16—0,25	≤0,80	≤0,80
1—18	20X17H2	0,17—0,25	≤0,80	≤0,80
2—2	15X12ВНМФ	0,12—0,18	≤0,40	0,50—0,90
2—3	18X12ВМБФР	0,15—0,22	≤0,50	≤0,50
3—3	12X17	≤0,12	≤0,80	≤0,7
3—6	15X25T	≤0,15	≤1,00	≤0,80
4—1	20X13H4Г9	0,15—0,30	≤0,80	8,0—10,0
4—4	07X17H7	≤0,09	≤0,80	≤0,80
5—1	08X20H14C2	≤0,08	2,00—3,00	≤1,50
5—5	08X21H6M2T	≤0,08	≤0,80	≤0,80
6—1	08X10H20T2	≤0,08	≤0,80	≤2,0
6—2	108X17H13M2T	≤0,08	≤0,80	≤2,0
6—29	08X18H9T	≤0,08	≤0,80	≤2,0

Марка по ГОСТу 5632—72	Массовая доля			
	Mo	Nb	V	Fe
1—12 1—18	—	—	—	—
2—2 2—3	0,50—0,70 0,40—0,60	— 0,20—0,40	0,15—0,30 0,15—0,30	—
3—3 3—6	—	—	—	Основа
4—1 4—4	—	—	—	—
5—1 5—5	— 1,80—2,50	—	—	—
6—1 6—2 6—29	— 2,0—3,0 —	—	—	—

Примечание. Знак + означает применение по данному назначению;

ных сталей (ГОСТ 5632—72)

Жаление элементов, %				
Cr	Ni	Ti	Al	W
12,0—14,00	—	—	—	—
16,0—18,0	1,50—2,50	—	—	—
11,0—13,0	0,40—0,80	—	—	0,70—1,10
11,0—13,0	—	—	—	0,40—0,70
16,0—18,0	—	—	—	—
24,0—27,0	—	0,50—0,80	—	—
12,0—14,0	3,70—4,70	—	—	—
16,0—17,5	7,0—8,0	—	—	—
19,0—22,0	12,0—15,0	—	—	—
20,0—22,0	5,50—6,50	0,20—0,40	—	—
10,0—12,0	18,0—20,0	1,50—2,50	≤1,00	—
16,0—18,0	12,0—14,0	5,6—0,70	—	—
17,0—19,0	8,00—9,50	5,0—0,80	—	—

элементов, %			Группа			Класс
S	P	Прочие элементы	1 (кор- розивно- стойкие)	2 (жаро- стойкие)	3 (тепло- устой- чивые)	
не более	не более					
0,025	0,035	—	++ +	—	+	M
0,025 0,025	0,030 0,030	≤0,003 B	—	—	+	Ф+М
0,025 0,025	0,035 0,035	—	++ ++	+	—	Ф
0,025	0,050 0,035	—	+	—	—	A + M
0,025	0,035	—	— +	+	—	A+Ф
0,030 0,020 0,020	0,035	—	++ ++ ++	— — +	— — +	A

++ означают преимущественное применение стали.

а для получения такой структуры при содержании углерода 0,4 % потребуется более 29 % хрома. Хромистые стали (обычно 10,5—12 % Cr) при их дополнительном легировании молибденом, вольфрамом, ниобием, ванадием, а иногда и никелем обладают повышенным сопротивлением ползучести при работе под напряжением при повышенных температурах, их используют как жаропрочные применительно к температурам эксплуатации до 600 °С.

Средне- и высоколегированные хромистые стали (до 12—13 % Cr и $C \geq 0,05$ — 0,06 %), имеющие область

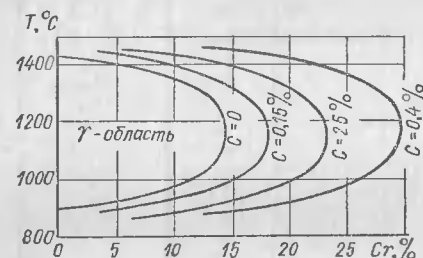


Рис. 140. Влияние углерода на γ -область в хромистых сталях

аустенита при высоких температурах, после охлаждения даже с умеренными скоростями при комнатной температуре приобретают мартенситную структуру.

При большом содержании хрома (более 16 % при 0,06 % C) сталь в процессе нагрева целиком не переходит

в состояние аустенита, а частично остается в ферритной фазе. Охлаждение стали приведет к получению мартенситно-ферритной структуры. При этом увеличение содержания хрома в стали (при $C = \text{const}$) способствует относительно увеличению ферритной составляющей в структуре.

Таким образом, стали, содержащие около 0,05—0,06 % углерода и 12—13 % хрома, относятся к мартенситному классу, а содержащие 13—16 % Cr — к мартенситно-ферритному и больше 16 % Cr — к ферритному классу. При большем содержании углерода соответственно граничные значения по хрому смещаются в область его большей концентрации.

Сварка мартенситных и мартенситно-ферритных высокохромистых сталей

Стали мартенситного класса в условиях сварочного термического цикла в участках зоны термического влияния (а также и в металле шва, если по составу он

подобен свариваемому металлу) закаляются на мартенсит с высокой твердостью и низкой деформационной способностью. В результате деформации, сопровождающие сварку, а также высокие остаточные и структурные напряжения длительного действия, всегда имеющиеся в сварных соединениях в исходном состоянии после сварки, могут привести к образованию холодных трещин. Они, как правило, образуются на последней стадии непрерывного охлаждения (обычно при температуре 100 °С и более низких) или при выдержке металла при комнатной температуре. Водород, находящийся в сварных соединениях и диффундирующий даже при низких температурах, значительно способствует образованию холодных трещин.

Крупнозернистый металл швов, а также металл в зоне термического влияния более склонен к образованию трещин, чем мелкозернистый. Поэтому модифицирование металла швов, предусматривающее измельчение зерна (например, титаном) и применение более жестких режимов (с меньшей погонной энергией), уменьшают вероятность образования трещин.

Радикальной мерой предотвращения трещин является предварительный и сопутствующий подогрев. Обычно для этих сталей рекомендуется общий (или иногда местный) подогрев до температуры 200—400 °С, для стали марки 08X13 принимается температура подогрева 100—120 °С, а для других сталей, например марок 12X13, 20X13 — 200—250 °С.

Если после сварки с подогревом выше верхней мартенситной точки, изделие посадить в печь не снижая температуры, то мартенситного превращения не произойдет, трещины в соединениях не образуются, но конечная структура будет грубозернистой ферритно-карбидной. Такой металл обладает малой прочностью и низкой вязкостью. Избежать этого можно, если после сварки с температурой сопутствующего подогрева произвести «подстуживание» примерно до 120—100 °С и выдержку при этой температуре около 2 ч (для завершения распада аустенит—мартенсит, без образования трещин), а затем посадку в печь всего изделия на термообработку.

Хромистые стали мартенситно-ферритные и ферритные обладают некоторой склонностью к межкристаллитной коррозии. Особо высокую склонность к межкристаллитной коррозии они приобретают после быстрого охлаждения. Для восстановления стойкости к межкристаллитной кор-

Таблица 44. Основные данные по ручной дуговой сварке неко

Марка стали	Тип электрода	Марка электрода	Содержание основных легирующих элементов в наплавленном металле, %			
			C	Mo	Ni	
12X13	Э-12X13	УОНИ-13/1X13	0,09—0,13	—	—	
15X11ВМФ	Э-12X11НВМФ	КТИ-10	0,10—0,18	0,6—0,9	0,6—0,9	
14X11В2МФ	Э-14X11НВМФ	ЦЛ-32	0,11—0,15	0,9—1,25	0,8—1,1	

розии возможно применение высокого отпуска, причем его температура и длительность для различных сталей различны.

Изделия из высокохромистых сталей сваривают ручной дуговой сваркой покрытыми электродами в углекислом газе и его смесях с инертными газами, плавящимися и неплавящимися электродами в инертных газах и их смесях и автоматической сваркой под специальными флюсами. Для уменьшения вероятности образования холодных трещин за счет водорода, для ручной дуговой сварки высокохромистых сталей нельзя применять электроды с покрытиями, содержащими органические соединения в качестве газообразующих. Следует применять электроды

Таблица 45. Основные данные по сварке в углекислом газе

Марка стали	Марка проволоки и шов	Содержание основных легируемых элементов в наплавленном металле, %				
		C	Si	Mn	Mo	Ni
02X13	С-08X14ГНТ Шов	0,10—0,12	0,5—0,2	1,1—0,7	—	0,2—
15X14ВНМФ	С-10X11НВМФ Шов	0,10—0,15	0,45—	0,5—	1,10—0,55	1,10—0,75
15X11МФБ	С-15X12НМВФБ Шов	0,16—0,15	0,4—0,2	0,5—0,7	0,75—0,55	1,1—0,75

торых мартенситных и мартенситно-ферритных сталей

Легирующие элементы в наплавленном металле, %			Режим отпуска		Механические свойства при 20 °С				
Cr	V	W	Температура, °С	Время, ч	σ_T	σ_B	δ	φ	KCU
11,0—13,0	—	—	760	4	580	860	14	54	60
9,5—11,5	0,2—0,4	0,9—1,2	730	5	600	750	15	55	50
10,0—12,0	0,2—0,4	0,9—1,4	730	7	600	750	12	40	40

с основными покрытиями, при которых газовая защита сварочной зоны осуществляется в результате распада карбонатов покрытия по реакции (45). Образующиеся при этом высококальциевые шлаки способствуют удалению из сварочной ванны серы и фосфора по реакциям (61), (62), (63). Сварку такими электродами выполняют на постоянном токе обратной полярности. Для уменьшения вероятности попадания водорода в сварочную ванну за счет влаги покрытия перед сваркой электроды следует прокалить при температуре 400—450 °С в течение 2 ч.

При сварке высокохромистых сталей плавящимся электродом в углекислом газе обеспечивается достаточное отнесение воздуха от сварочной зоны, но металл может

некоторых мартенситных и мартенситно-ферритных сталей

Легирующие элементы в наплавленном металле, %					Режим отпуска		Механические свойства при 20 °С				
Cr	V	W	Nb	Ti	Температура, °С	Время, ч	σ_T	σ_B	δ	φ	KCU
13,5—14,5	—	—	—	0,8—	700	5	580	740	18	52	65
11,0	0,25	0,6	0,1	—	720	9	830	970	12	39	55
12,0—11,0	0,4—0,25	1,1—0,5	—	—	790	5	620	770	17	52	42

Т а б л и ц а 46. Химический состав и механические свойства при автоматической сварке под флюсом мартенсит-
ных и мартенситно-ферритных сталей

Марка		Проволока и шов	Химический состав сварочной проволоки и наплавленного металла, %					
стали	проволоки флюса		C	Si	Mn	Mo	Ni	Cr
1X12B1MФ	15X12MФБ	АН-17	0,13	0,3	0,9	0,7	0,9	11,0
		48-ОФ-6	0,18	0,1	1,3	1,1	1,3	12,5
	ЭП-249	АН-17	0,12	0,25	0,79	0,85	0,70	10,3
		48-ОФ-6	0,15	0,53	0,87	0,83	0,67	11,2
20X13	Св-08У14Т	Шов	0,09	0,45	0,2	—	0,44	12,7
14X17H2	Св-08X18H2-ГТ	Шов	0,08	0,20	0,70	—	2,0	16,2

Продолжение табл. 46

Марка			Проволока и шов	Химический состав сварочной проволоки и наплавленного металла, %				Режим отпуска		Механические свойства при 20 °С									
Стали	проволоки	флюса		V	W	Nb	Ti	Температура, °С	Время, ч	σ _T	σ _B	δ	ψ	KCV					
1X12B1MФ	15X12MФБ	АН-17	0,2	0,8	0,15	—	750	5	—	—	—	—	—	—					
		48-ОФ-6	0,4	1,2	0,20														
	ЭП-249	АН-17	0,37	1,18	0,09										600	780	18,1	44,7	55
		48-ОФ-6	0,40	1,12	0,11										720	860	14,7	42,6	58
20X13	Св-08Y14Т	АН-26	Шов	—	—	0,14	700	3	580	730	18,0	44	81						
14X17H2	Св-08X18H2-ГТ	АН-26							600	770	20,0	45,0	70						

значительно окисляться. Для предотвращения окисления основных легирующих элементов в электродную проволоку необходимо вводить достаточное количество раскислителей.

Сварка высокохромистых сталей под высококремнистыми высокомарганцовистыми флюсами не обеспечивает требуемого качества в связи с кремнемарганцевосстановительными процессами, при которых происходит выгорание хрома (до 2 %) и уменьшение в швах кремния и марганца, приводящие к снижению пластичности и вязкости этих сталей.

Для сварки под флюсом высокохромистых сталей следует применять высокоосновные флюсы 48-ОФ-6, АН-26 или слабоокисленный низкокремнистый флюс АН-17 (см. табл. 15).

Примененные материалы, химический состав и механические свойства металла швов при сварке некоторых высокохромистых сталей мартенситного, мартенситно-ферритного класса приведены в табл. 44—46.

§ 45. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА, КЛАССИФИКАЦИЯ И СПОСОБЫ СВАРКИ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ

Свойства и классификация

Высоколегированные стали и сплавы являются важнейшими материалами, широко применяемыми в энергетическом, химическом, нефтяном машиностроении, ракетной и атомной технике. Из них изготавливают конструкции, работающие в широком диапазоне температур.

Существующие аустенитные высоколегированные стали и сплавы различают по содержанию основных легирующих элементов хрома и никеля; они классифицируются по системе легирования, структурному классу, свойствам и служебному назначению.

Определенный подбор легирующих элементов определяет свойства и основные характеристики этих сталей и сплавов. Коррозионно-стойкие стали характерны пониженным содержанием углерода (не более 0,12 %). При соответствующем легировании и термической обработке стали обладают высокой коррозионной стойкостью при 20 °С и при повышенной температуре в газовой среде и

в водных растворах кислот, щелочей и жидкометаллических средах.

Жаропрочные стали имеют высокие механические свойства при повышенных температурах и способны выдерживать нагрузки при нагреве в течение длительного времени. Для придания этих свойств стали и сплавы легируют элементами-упрочнителями — молибденом и вольфрамом.

Жаростойкие стали и сплавы устойчивы к химическому разрушению поверхности в газовых средах при температурах 1100—1150 °С. Обычно их используют для слабонагруженных деталей (нагревательные элементы, печная арматура, газопроводные системы и т. д.). Высокая окалиностойкость этих сталей и сплавов достигается легированием алюминием и кремнием, которое способствует созданию прочных и плотных окислов на поверхности деталей, предохраняющих металл от контакта с газовой средой.

В зависимости от основной структуры, получаемой при охлаждении на воздухе, различают следующие классы аустенитных сталей: аустенитно-мартенситные; аустенитно-ферритные; аустенитные. Сплавы на железоникелевой (при содержании никеля более 30 %) и никелевой основе по структуре являются стабильно аустенитными и не имеют структурных превращений при охлаждении на воздухе.

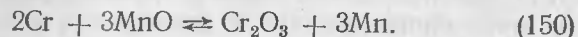
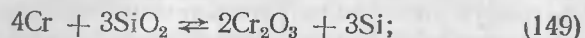
После соответствующей термической обработки высоколегированные стали и сплавы приобретают высокие прочностные и пластические свойства.

Металлургические особенности сварки. Эти стали содержат мало вредных примесей и обладают хорошей раскисленностью, малой чувствительностью к концентраторам напряжений и распространению трещин. Поэтому при их сварке нет необходимости в интенсивной металлургической обработке металла шва шлаком, т. е. шлаки должны быть нейтральными.

В процессе сварки необходимо предохранить от окисления легирующие элементы, содержащиеся в основном металле, обеспечить максимальный коэффициент перехода этих элементов из электрода в шов, создать хорошую защиту сварочной ванны от атмосферных газов.

Такой принцип пассивной защиты обеспечивается при сварке аустенитных сталей в инертных газах. Ручная дуговая сварка производится электродами с покрытием основного вида, полуавтоматическая и автоматическая —

под флюсами, содержащими небольшое количество оксидов марганца, кремния и др. Чем больше в расплавленном покрытии или флюсе SiO_2 и MnO , тем сильнее окисляется хром в сварочной ванне:



Значительное окисление хрома может существенно снизить коррозионную стойкость, жаростойкость и другие физико-химические свойства шва. Повышенное содержание кремния может явиться причиной появления горячих трещин в однофазном аустенитном металле вследствие образования тонкой силикатной пленки на границах зерен аустенита или легкоплавкой малопрочной эвтектики. Однако полностью исключать из плавленного флюса SiO_2 нецелесообразно, так как с его уменьшением повышается содержание водорода в металле шва и возможно образование пор. Это связано с тем, что при отсутствии во флюсе SiO_2 в газовой фазе не протекает реакция



в результате которой водород удаляется из металла в виде нерастворимого в металле фтористого водорода.

Образование пор в аустенитном металле за счет азота и углерода менее вероятно вследствие высокой растворимости и небольшого выгорания углерода в хромоникелевых аустенитных сталях.

Теплофизические свойства аустенитных сталей существенно отличаются от свойств углеродистых низколегированных перлитных сталей. У них более высокий коэффициент линейного теплового расширения, поэтому значительно увеличиваются области сварного соединения, где имеет место пластическая деформация, что после остывания приводит к увеличению остаточных деформаций.

Низкая теплопроводность приводит к более интенсивному местному разогреву, что при одинаковых режимах увеличивает скорость плавления электрода и глубину провара. Поэтому сварку аустенитных сталей следует производить при меньшем сварочном токе.

Высокая жаропрочность аустенитных сталей требует более высоких температур отпуска ($800\text{--}850^\circ\text{C}$) для снятия остаточных сварочных напряжений, так как они имеют более высокий, чем у стали Ст3, предел текучести.

Горячие трещины при сварке аустенитных сталей и способы борьбы с ними. Хрупкие разрушения — трещины — в сварных соединениях аустенитных сталей могут появляться в процессе сварки и после сварки. Получение сварных соединений аустенитных сталей, свободных от трещин, является наиболее важной задачей. Основные причины образования горячих трещин в сварных швах низкоуглеродистой и низколегированной сталей при сварке аустенитных сталей усугубляются рядом факторов.

При затвердевании чисто аустенитного металла из жидкой фазы выпадают кристаллы, имеющие решетку γ -железа. Вначале кристаллизуются (затвердевают) более тугоплавкие составляющие, а в конце кристаллизации в жидкой фазе остаются легкоплавкие малопрочные составляющие сплава (эвтектики), которые оттесняются растущими кристаллитами к границам зерен (рис. 141, а).

Вследствие отсутствия аллотропических превращений в твердом металле в процессе охлаждения кристаллы имеют значительные размеры, большое сечение с малоразвитой поверхностью и толстыми межкристаллическими прослойками, распределяющимися по сравнительно небольшой поверхности крупных кристаллитов; прочность и деформационная способность такого металла очень низкая. Литейная усадка металла шва и непрерывно растущие в процессе охлаждения растягивающие напряжения приводят к разрушению граничных связей, т. е. появлению горячих трещин.

Несколько иначе происходит затвердевание двухфазных аустенитно-ферритных швов (рис. 141). При кристаллизации двухфазного металла образуется большое количество центров кристаллизации, так как наряду с аустенитными кристаллитами из расплава выпадают и растут кристаллиты феррита (δ -железа), который не претерпевает превращений при охлаждении. Участки феррита располагаются как в междоузльных пространствах, так и на границах кристаллитов аустенита, что препятствует их направленному росту (рис. 141, б). Структура металла получается более мелкозернистой и дезориентированной, а межкристаллические прослойки более тонкими, чем в однофазных аустенитных швах.

Уменьшение толщины межкристаллических прослоек обусловлено тем, что при том же количестве легкоплавких эвтектических составляющих они распределяются по сильно развитой поверхности мелких зерен. Кроме того,

феррит обладает более высокой способностью растворять вредные примеси (серу, фосфор, кислород и кремний).

Последние порции кристаллизирующейся жидкой фазы менее обогащены сульфидами, фосфидами и силикатами, образующими эвтектики. Поэтому швы с двухфазной

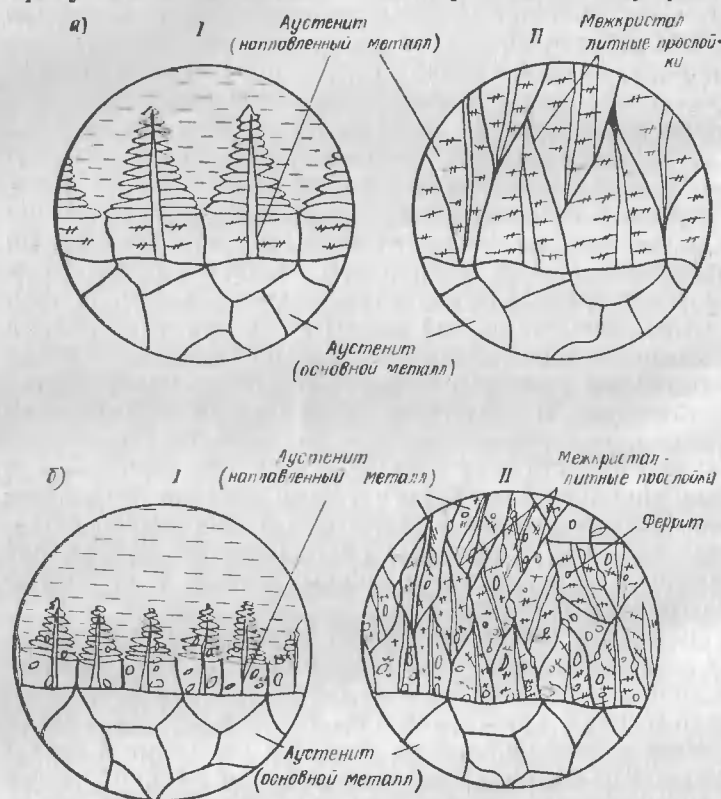


Рис. 141. Кристаллизация однофазного аустенитного наплавленного металла (а) и двухфазного аустенитно-ферритного наплавленного металла (б):

I — рост кристаллитов; II — вид затвердевших кристаллитов

аустенитно-ферритной структурой стойки против образования горячих трещин.

Применение электродов с фтористокальциевыми покрытиями и высокоосновных флюсов, шлаки которых рафинируют металл шва и иногда модифицируют его структуру, повышает стойкость к горячим трещинам.

Азот — сильный аустенизатор, способствующий измельчению структуры за счет увеличения центров кристаллизации в виде тугоплавких нитридов, что повышает стойкость против горячих трещин. Механизированные способы сварки, обеспечивая равномерное проплавление основного металла по длине шва и постоянство термического цикла сварки, позволяют получить и более стабильные структуры на всей длине сварного соединения, уменьшая склонность к горячим трещинам.

Применение технологических приемов, способствующих изменению коэффициента формы провара, а также направления роста кристаллитов аустенита (см. рис. 58, б), уменьшит склонность шва к горячим трещинам.

Но кроме общих положений по образованию горячих трещин в аустенитных швах нас интересует влияние различных легированных элементов, легкоплавких примесей и газов на склонность к горячим трещинам сварных швов хромоникелевых аустенитных сталей.

Аустенитообразующие. Никель способствует образованию горячих трещин не только потому, что как аустенизатор способствует образованию однофазной крупнозернистой структуры, но главное потому, что, соединяясь с серой, образует легкоплавкий сульфид NiS_2 , имеющий температуру плавления $625^\circ C$. Кроме того, никель дает легкоплавкие соединения с кремнием, ниобием и бором.

Марганец, введенный в аустенитный шов через сварочную проволоку, действует как десульфатор.

Углерод в аустенитных сталях влияет на склонность к трещинам двояко: при содержании до 0,18—0,20 %, как в низколегированных сталях, усиливает склонность к кристаллизационным трещинам. По мере дальнейшего увеличения содержания углерода в шве он из возбудителя горячих трещин превращается в средство их устранения. Это связано с измельчением структуры и увеличением количества эвтектической жидкости, которая, заполняя промежутки между кристаллитами, «залечивает» горячие трещины.

Положительное действие повышенного содержания углерода (0,3—0,5 %) можно наблюдать при сварке аустенитных сталей всех типов.

Азот в аустенитных сталях образует большое число тугоплавких нитридов, что способствует измельчению структуры шва и снижению склонности к трещинообразованию.

Бор в малых количествах вызывает интенсивное раскисление аустенитных швов, но при возрастании его концентрации из возбудителя трещин становится эффективным средством их предотвращения.

Ферритообразующие. Хром в сварных швах жаропрочных сплавов уменьшает склонность к горячим трещинам.

Кремний является более активным ферритообразующим, чем хром, и его действие на горячеломкость проявляется по-разному. Если соотношение концентрации аустенито- и ферритообразующих в шве таково, что повышение содержания кремния повлечет за собой появление первичного феррита, то действие кремния будет положительным — трещин не будет. В аустенитном шве, когда содержание кремния составляет всего 0,3—0,4 %, он действует как один из самых сильных возбудителей кристаллизационных трещин.

Титан — активный ферритизатор, повышает стойкость двухфазных хромоникелевых сталей типа 18—9 (18 % Cr, 9 % Ni) против горячих трещин.

В стабильно аустенитных высоколегированных сталях титан в связи с образованием с никелем легкоплавких эвтектик может явиться причиной образования горячих трещин. Увеличение содержания титана приводит к значительному увеличению количества эвтектики, и она становится способной залечивать горячие трещины.

Алюминий, цирконий действуют наподобие титана.

Ванадий заметно повышает стойкость сварных швов аустенитных сталей против образования горячих трещин, так как является энергичным ферритизатором, десульфатором и измельчает первичную структуру швов. В отличие от Ti, Al, Cr его положительное влияние проявляется как при малом, так и при повышенном содержании.

Вольфрам и молибден повышают стойкость аустенитных сталей против горячих трещин.

Ниобий по действию на склонность к образованию горячих трещин в аустенитных сталях во многом сходен с титаном.

Кислород окисляет ферритообразующие элементы, имеющие большое сродство к нему (Al, Ti, Si, V, Cr), что косвенно действует на первичную структуру и приводит к снижению стойкости шва к горячим трещинам. В то же время установлено, что в глубокоаустенитных высоконикелевых сталях вследствие окисления вредных приме-

сей и водорода повышается сопротивляемость швов образованию горячих трещин. Вероятно этим можно объяснить меньшую склонность к горячим трещинам аустенитных швов, сваренных в среде углекислого газа.

Охрупчивание сварных соединений из хромоникелевых аустенитных сталей. В сварных швах сталей типа 25—20 (25 % Cr, 20 % Ni) длительный нагрев в интервале температур 650—875 °C вызывает появление новой структурной составляющей, так называемой σ -фазы (сигма-фазы). Сигма-фаза — условное название хрупкой твердой немагнитной структурной составляющей из интерметаллида типа FeCr, имеющего переменный химический состав и сложную кристаллическую решетку. Образуется она в результате протекания диффузионных процессов в твердом металле. Она может образоваться непосредственно из аустенита по схеме $\gamma \rightarrow \sigma$ или в двухфазных швах из феррита по схеме $\alpha (\delta) \rightarrow \sigma$.

В сварных швах аустенитной стали типа 25—20 образование сигма-фазы происходит наиболее интенсивно при $T = 800 \div 875$ °C, менее интенсивно при $T = 650 \div 750$ °C, а при температуре 875—900 °C σ -фаза вообще не образуется. По своему химическому составу σ -фаза резко отличается от исходного состава (табл. 47).

Т а б л и ц а 47. Химический состав σ -фазы, образовавшейся в аустенитном и аустенитно-ферритном сварном шве

Марка металла шва	Структура шва по строению	Объект анализа	Массовое содержание элементов, %					
			Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo
X25H20	A	Шов	0,24	1,50	25,5	18,8	—	—
X25H20B2	A	σ-фаза	1,10	0,61	51,8	3,0	—	—
		Шов	0,34	1,66	23,8	18,2	1,8	—
X25H20M2	A	σ-фаза	1,26	0,38	54,1	2,6	7,8	—
		Шов	0,25	3,9	23,8	18,5	—	1,36
X27H13	A+Φ (14—16 %)	σ-фаза	1,11	1,1	53,2	2,9	—	3,31
		Шов	0,40	3,0	26,7	12,9	—	—
		σ-фаза	—	—	50,0	1,8	—	—

Из приведенных в таблице данных следует, что σ -фаза значительно обогащается ферритизаторами и обедняется аустенитизаторами. В сварном шве σ -фаза выпадает преимущественно на границах столбчатых кристаллитов

аустенита, а в деформированных швах и внутрикристаллических — по линиям сдвига и между ними.

В аустенитно-ферритных швах интервал температур образования σ -фазы значительно шире, и скорость протекания превращений выше, чем в однофазных аустенитных швах. Это результат большей скорости диффузии элементов в феррите, чем в аустените; процесс сигматизации аустенитно-ферритных швов резко ускоряется с повышением температуры.

Длительный нагрев аустенитно-ферритных швов при температуре 650—875 °С вызывает перерождение феррита в σ -фазу. Характерно, что в однопроходных швах, находящихся в области опасных температур непродолжительное время, σ -фаза не образуется. Но при многопроходной сварке толстой аустенитной стали типа 18—9 в нижних слоях, если они содержат много ферритизаторов, многократное термическое воздействие может вызвать перерождение отдельных участков феррита в σ -фазу и охрупчивание шва может быть столь значительным, что еще в процессе сварки шов разрушится. Поэтому для обеспечения жаропрочности сварных соединений из аустенитно-ферритной стали необходимо ограничивать количество феррита в сварных швах. Как показал опыт, оно не должно превышать 5—7 %. В этом случае сварные швы могут длительно работать при температуре до 600—650 °С без значительного охрупчивания.

Проверка содержания феррита в наплавленном металле по химическому составу может производиться по диаграмме Шеффлера (см. рис. 67). Но более точные данные по содержанию феррита получают при использовании специальных приборов, так называемых ферритометров.

Технология сварки хромоникелевых аустенитных сталей. Все заготовительные операции на аустенитных сталях, выполняемые методами холодной или горячей обработки, производятся в основном теми же способами и на том же оборудовании, что и для углеродистых конструкционных сталей. Подготовка кромок деталей под сварку должна производиться механическим путем (фрезерованием, строжкой, токарной обработкой). Допускается подготовка кромок сжатой дугой или газоплюсовой резкой, требующей последующей механической зачистки огнестойких кромок на глубину не менее 0,8 мм.

При сборке деталей перед прихваткой и сваркой во избежание образования надрезов и трещин на поверх-

ности основного металла в месте попадания брызг расплавленного металла участки рядом со швом должны быть покрыты одним из видов защитных покрытий, рекомендованных на с. 281.

При изготовлении сварных конструкций из аустенитных сталей могут применяться все способы электрической сварки плавлением. Выбор способа сварки производится с учетом толщины свариваемого металла, размеров и формы конструкции, расположения швов в пространстве и их доступности, требований к сварным соединениям и т. д.

Основной особенностью *ручной дуговой сварки* аустенитных сталей является необходимость обеспечения требуемого химического состава металла шва при различных типах сварных соединений и пространственных положениях сварки с учетом изменения доли участия основного и электродного металла в металле шва. Это заставляет корректировать состав покрытия с целью обеспечения необходимого содержания в шве феррита и тем самым предупреждения образования в шве горячих трещин. Этим же достигается и необходимая жаропрочность и коррозионная стойкость швов.

Применением электродов с фтористокальциевым покрытием, уменьшающим угар легирующих элементов, достигается получение металла шва с необходимым химическим составом и структурами. Уменьшению угара легирующих элементов способствует и поддержание короткой дуги без поперечных колебаний электрода. Последнее уменьшает и вероятность образования дефектов на поверхности основного металла в результате прилипания брызг.

Состав покрытия электрода определяет необходимость применения постоянного тока обратной полярности (при переменном токе или постоянном токе прямой полярности дуга неустойчива), величину которого определяют по формуле (112), а коэффициент K в зависимости от диаметра электрода принимают не более 25—30 А/мм. В потолочном и вертикальных положениях силу сварочного тока уменьшают на 10—30 % по сравнению с силой тока, выбранной для нижнего положения сварки.

Сварку покрытыми электродами рекомендуется выполнять валиками малого сечения и для повышения стойкости против горячих трещин применять электроды диаметром 3 мм с минимальным проплавлением основного металла. Тщательная прокалка электродов перед сваркой, режим которой определяется их маркой, способствует

Т а б л и ц а 48. Некоторые марки электродов и условия работы высоколегированных сталей и сплавов

Марка стали	Условия работы	Марка электрода	Тип электрода	Содержание α -фазы (%) и структура шва
<i>Коррозионно-стойкие стали</i>				
08X18H10	Агрессивные среды; стойкость к межкристаллитной коррозии	ЦЛ-11	Э-04X20H9	2,5—7,0
12X18H10T; 08X22H6T	Температура до 600 °С; жидкие среды; стойкость к межкристаллитной коррозии	Л38М	Э-07X20H9; Э-08X19H10Г2Б; Э-02X10H9Б	3—5
10X17H11M2T; 08X18H10Б; 08X21H6M2T	Температура до 700 °С; стойкость к межкристаллитной коррозии	СЛ-28	Э-08X19H10Г2МБ; Э-09X19H10Г2М2Б	4—5
10X17H13M3T	Стойкость к межкристаллитной коррозии	НЖ-13	Э-09X19H10Г2М2Б	4—8
<i>Жаропрочные стали</i>				
12X18H9; 12X18H10T; 08X18H12T; 10X23H18	Температура до 800 °С	ЦТ-26	Э-08X16H8M2 Э-08X17H8M2	2—4
	Температуры выше 850 °С	ОЗЛ-4; ОЗЛ-6	Э-10X25H13Г2	Св. 2,5 %
<i>Жаростойкие стали</i>				
20X20X14C2 20X25H20C2; 30X18H25C2; Х25H38BT; ХН75МБГЮ	Температуры до 900—1100 °С Температура до 1050 °С; жаростойкость и жаропрочность Высокая температура	ОЗЛ ОЗЛ-9-1 ЭА-981-15	Э-12X24H14C2 Э-28X24H16Г6 Э-09X15H25M6Г2Ф	3—10 % Аустенитно-карбидная Аустенитная

уменьшению вероятности образования в швах пор и трещин, вызываемых водородом. Некоторые марки электродов, рекомендуемые для различных сталей аустенитного класса, в зависимости от условий работы конструкции приведены в табл. 48, а их механические свойства — в табл. 49.

Одним из основных способов сварки высоколегированных сталей толщиной 3—50 мм, применяемых в химической, нефтехимической аппаратуре, атомной технике и некоторых других отраслях промышленности является *сварка под флюсом*. Она имеет большое преимущество перед ручной дуговой сваркой покрытыми электродами ввиду стабильности состава и свойств металла по всей длине шва, при сварке с разделкой и без разделки кромок. Это достигается отсутствием частых кратеров, образующихся при смене электрода, обрывов дуги, равномерностью плавления электродной проволоки и основного металла по длине шва (при ручной сварке в связи с изменением вылета электрода скорость его плавления вначале будет меньше, чем в конце, что периодически изменяет долю основного металла в шве, а значит и его состав) и более надежной защитой зоны сварки от окисления легирующих компонентов кислородом воздуха.

Хорошее формирование поверхности швов с мелкой чешуйчатостью и плавным переходом к основному металлу, отсутствие брызг на поверхности изделия заметно повышают коррозионную стойкость сварных соединений. При этом способе уменьшается трудоемкость подготовительных работ, так как разделку кромок производят на металле толщиной выше 12 мм (при ручной сварке свыше 3—5 мм). Возможна сварка с повышенным зазором и без разделки кромок стали толщиной до 30—40 мм. Уменьшение потерь на угар, разбрызгивание и огарки электродов на 10—20 % снижает расход дорогостоящей сварочной проволоки.

При сварке под флюсом значительно труднее обеспечить необходимое содержание ферритной фазы в металле шва только за счет выбора сварочных флюсов и проволок, которые в пределах одной марки имеют значительные колебания химического состава. На содержание ферритной фазы в металле влияет также его толщина и разные формы разделки, приводящие к изменению доли участия основного металла в металле шва. Техника и режимы сварки под флюсом высоколегированных коррозионно-стойких и жаропрочных сталей отличаются от сварки обычных низколегированных.

Для предупреждения перегрева металла и связанного с этим укрупнения структуры, возможности появления трещин и снижения эксплуатационных свойств сварного соединения рекомендуется выполнять сварку валиками небольшого сечения, применяя для этого проволоку диаметром 2—3 мм, а в связи с высоким электросопротивлением

аустенитных сталей вылет электрода следует уменьшить в 1,5—2 раза.

Легировать шов можно через флюс (табл. 50) или проволоку (табл. 51), последнее предпочтительнее, так как обеспечивает необходимую стабильность металла шва.

Для сварки используют низкокремнистые фторидные флюсы, создающие в зоне сварки безокислительные или малоокислительные среды, что приводит к минимальному угару легирующих элементов. Для снижения вероятности образования пор в швах флюсы для высоколегированных сталей необходимо прокалить непосредственно перед сваркой при 500—800 °С в течение 1—2 ч. Остатки шлака и флюса на поверхности швов, которые могут служить очагами коррозии сварных соединений на коррозионно- и жаростойких сталях, необходимо тщательно удалять.

Марка электрода	σ_T	σ_B	$\delta, \%$	$KCU, \text{Дж/см}^2$
	МПа/мм ²			
Коррозионно-стойкие стали				
ЦЛ-11	360	600	24	70
ОЗЛ-7	400	640	25	100
Л-38М	300	600	30	90
СЛ-28	—	600	38	120
11Ж-13	450	600	26	100
Жаростойкие стали				
ОЗЛ-5	350	600	25	60
ОЗЛ-6	350	570	33	100
ОЗЛ-9-1	500	650	12	50

Особенностью электрошлаковой сварки является пониженная чувствительность к образованию горячих трещин, что объясняется малой скоростью перемещения источника нагрева и характером кристаллизации металла сварочной ванны, в результате создаются условия получения чисто аустенитных швов без трещин. Однако длительное пребывание металла шва и околошовной зоны при повышенных температурах увеличивает его перегрев и

Таблица 50. Флюсы для электродуговой и электрошлаковой сварки высоколегированных сталей

Вид сварки	Марка флюса
Автоматическая электродуговая аустенитно-ферритными швами	АНФ-14; АНФ-16; 48-ОФ-10; К-8
Автоматическая электродуговая аустенитно-ферритными швами с небольшим запасом аустенита	АН-26
Автоматическая электродуговая чисто аустенитными швами с большим запасом аустенита	АНФ-5; ФЦК
Автоматическая электродуговая и электрошлаковая чисто аустенитными швами с большим запасом аустенита	48-ОФ-6
Электрошлаковая чисто аустенитными швами с большим запасом аустенита	АНФ-1; АНФ-6; АНФ-7; АН-29; АН-292

ширину околошовной зоны, а длительное пребывание металла при температурах 1200—1250 °С приводит к изменению его структуры, снижает прочностные и пластические свойства. В результате сварные соединения теплоустойчивых сталей предрасположены к разрушениям в процессе термической обработки или эксплуатации при повышенных температурах.

Перегрев при сварке зоны термического влияния коррозионно-стойких сталей может привести к образованию в ней ножевой коррозии, поэтому для предупреждения указанных дефектов необходима термообработка сварных изделий (закалка или стабилизирующий отжиг). При

Т а б л и ц а 51. Некоторые марки сварочной проволоки для электро-
дуговой сварки под флюсом и электрошлаковой сварки высоколеги-
рованных сталей

Марка стали	Условия работы	Марка проволоки (ГОСТ 2246—70)
<i>Коррозионно-стойкие стали</i>		
12X18H9; 08X18H10; 12X18H10T; 12X18H9T	Стойкость к межкри- сталлитной коррозии	Св-0,1X19H9; Св-0,4X19H9; Св-07X18H9TЮ; Св-04X19H9C2; Св-05X19H9Ф3C2
12X18H10T; 08X18H10T; 08X18H12T; 08X18H12B	Температура выше 350 °С; стойкость к меж- кристаллитной корро- зии	Св-07X19H10Б; Св-05X20H9ФБС
10X17H13M3T; 0,8X18H12B	Стойкость к межкри- сталлитной коррозии	Св-08X19H10M3Б; Св-06X20H11M3ТБ
08X18H10; 12X18H10T; 12X18H9T	Сварка в углекислом газе; стойкость к меж- кристаллитной корро- зии	Св-08X25H13БТЮ
<i>Жаропрочные стали</i>		
12X18H9	Температура до 800 °С	Св-04X19H19
12X18H9Б; 08X18H12T	Температура до 800— 900 °С	Св-08X18H8Г2Б
X15H35B4T	Высокая температура	Св-06X19H10M3T
<i>Жаростойкие стали</i>		
20X23H13; 08X20H14C2 20X23H18	Температура 800—900 °С	Св-07X25H13
	Температура 900— 1100 °С	Св-07X25H12Г2Т; Св-06X25H12ТЮ; Св-08X25H13БТЮ
XH35BЮ; 20X25H20C2	Температура до 1200 °С	Св-08XH50

выборе флюса и сварочной проволоки необходимо учиты-
вать проникновение кислорода воздуха через поверхность
шлаковой ванны, что приводит к угару легкоокисляющих-
ся элементов (титана, марганца и др.). Это вызывает не-
обходимость в некоторых случаях защищать поверхность
шлаковой ванны путем обдува аргоном.

Электрошлаковую сварку высоколегированных сталей
можно выполнять проволочным или пластинчатыми элект-
родами (табл. 52). Изделия большой толщины со швами не-
большой протяженности целесообразно сваривать пластин-
чатым электродом, изготавливать их значительно проще.
Но сварка проволокой позволяет в широких пределах,
варьируя режимом, изменять форму металлической ванны
и характер кристаллизации шва, а это является одним
из действенных факторов, обеспечивающих получение
швов без горячих трещин.

Однако жесткость сварочной проволоки затрудняет
длительную и надежную работу токоподводящих и пода-
ющих узлов сварочной аппаратуры.

При сварке в углекислом газе создается окислительная
атмосфера в дуге за счет диссоциации углекислого газа,
вызывающая повышенное (до 50 %) выгорание титана и
алюминия. Меньше выгорают марганец, кремний и другие
легирующие элементы, поэтому при сварке коррозионно-
стойких сталей в углекислом газе применяют сварочные
проволоки, содержащие раскисляющие и карбидообразу-
ющие элементы (алюминий, титан, ниобий). Недостатком
сварки в углекислом газе является интенсивное раз-
брызгивание металла и образование на поверхности шва
плотных пленок оксидов, прочно сцепленных с металлом,
что может снизить коррозионную стойкость и жаростой-
кость сварного соединения.

Для уменьшения налипания брызг на основной металл
наносит эмульсии (с. 281), а для борьбы с оксидной плен-
кой подается в дугу небольшое количество фторидного
флюса АНФ-5.

Сварка плавящимся электродом в углекислом газе про-
изводится на полуавтоматах и автоматах. При этом для
сварки сталей марки 12X18H10T рекомендуется прово-
лока Св-07X18H9ТЮ, Св-08X20H9C2БТЮ; для сталей
марки 12X18H12T — проволока Св-Х25H13БТЮ, а для
хромоникелемолибденовых сталей — проволока марок
Св-06X19H10M3T и Св-06X20H11M3ТБ. Сварка в угле-
кислом газе производится во всех пространственных по-

Т а б л и ц а 52. Типовой режим электрошлаковой сварки высоколегированных сталей и сплавов

Толщина металла, мм	Электрод	Диаметр, (размеры), мм	Марка флюса	Зазор, мм	Скорость подачи электрода, м/ч	Сила сварочного тока, А	Напряжение, В	Глубина шлаковой ванны, мм
100	Проволока	3	АНФ-7	28—32	330	600—800	40—42	25—35
100	Пластина	10×100	АНФ-7	28—32	2,4	1200—1300	24—26	15—20
200	»	12×200	АНФ-1	38—40	1,9	3500—4000	22—24	15—20
200	»	12×200	АНФ-6	38—40	1,9	1800—2000	26—28	15—20

Т а б л и ц а 53. Режимы дуговой сварки высоколегированных сталей без разделки кромок плавящимся электродом в углекислом газе

Толщина металла, мм	Шов	Диаметр проволоки, мм	Вылет электрода, мм	Сила сварочного тока, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Расход углекислого газа, л/мин
1	Односторонний	1	10	80	16	80	10—12
3	»	2	15	230—240	24—28	45—50	12—15
6	Двусторонний	2	15	250—260	28—30	30	12—15
8	»	3	15	350—360	30—32	—	—
		2	15—20	380—400	30—32	30	12—15
		3	20—25	430—450	33—35	—	12—15
10	»	2	25—30	530—560	34—36	—	12—15

ложениях, что позволяет механизировать сварочные работы на конструкциях из высоколегированных сталей в монтажных условиях.

Ориентировочные режимы дуговой сварки в углекислом газе высоколегированных сталей без разделки кромок плавящимся электродом в углекислом газе приведены в табл. 53.

При сварке в инертных газах повышается стабильность дуги и снижается угар легирующих элементов, что важно при сварке высоколегированных сталей.

Сварку аустенитных сталей в инертных газах выполняют неплавящимся (вольфрамовым) или плавящимся электродом. Обычно ее применяют для сварки материала толщиной до 7 мм, но особо эффективна она при малых толщинах (до 1,5 мм), когда при применении других способов наблюдаются прожоги. Однако в некоторых случаях ее применяют при сварке неповоротных стыковых труб большой толщины, и сварке корневых швов в разделке при изготовлении особо ответственных толстостенных изделий. Сварку ведут без присадочного материала или с присадочным материалом на постоянном токе прямой полярности. Но при сварке стали или сплава с повышенным содержанием алюминия применяют переменный ток, чтобы за счет катодного распыления разрушить поверхностную пленку оксидов.

Плазменная сварка также используется для высоколегированных сталей. Ее преимуществами являются чрезвычайно малый расход защитного газа, возможность получения плазменных струй различного сечения (круглого, прямоугольного, эллипсовидного и т. д.). Ее можно использовать для сварки очень малых толщин металла и для металла толщиной до 12 мм. Примерные режимы сварки высоколегированных сталей вольфрамовым электродом на постоянном токе обратной полярности присадочной проволокой диаметром 1,6—2,0 мм приведены в табл. 54.

Сварку плавящимся электродом производят в инертных, а также активных газах или смеси газов. При сварке высоколегированных сталей, содержащих легкоокисляющиеся элементы (алюминий, титан и др.), следует использовать инертные газы, преимущественно аргон, и вести процесс на плотностях тока, обеспечивающих струйный перенос электродного металла. Так, при сварке в аргоне стыковочное соединение на стали типа 18—9

Таблица 54. Режимы сварки вольфрамовым электродом в аргоне высоколегированных сталей

Толщина металла, мм	Тип соединения	Сила сварочного тока, А	Расход аргона, л/мин	Скорость, м/ч
Ручная сварка				
1	С отбортовкой	35—60	3,5—4	—
2		65—120	5—6	
3		100—140	6—7	
1	Встык без раз- делки с присад- кой	40—70	3,5—4	—
2		75—120	5—6	
3		120—160	6—7	
Автоматическая сварка				
1	Встык без при- сатки	60—120	4	35—60
2,5		110—200	6—7	25—30
4		130—250	7—8	25—30
1	Встык с при- садкой	80—140	4	30—60
2		140—240	6—7	20—30
4		200—280	7—8	15—30

толщиной 5—6 мм на постоянном токе обратной полярности проволокой диаметром 1,2 мм при сварочном токе 230—300 А, напряжении 16—20 В, расходе газа 16—20 м/мин будет иметь место струйный перенос электродного металла. При этом дуга имеет высокую стабильность, и практически исключается разбрызгивание металла, что благоприятно сказывается на формировании швов в различных пространственных положениях и исключает вероятность образования очагов коррозии, связанных с разбрызгиванием при сварке коррозионно-стойких и жаростойких сталей. Однако струйный перенос в аргоне возникает при критических токах, когда возможно образование прожогов при сварке тонколистового металла.

Уменьшения критического тока можно достичь, добавив к аргону 3—5 % кислорода, за счет чего уменьшается вероятность образования пор, вызванных водородом, или применив для сварки смеси аргона с 15—20 % углекислого газа, что уменьшает расход дорогостоящего аргона. Но наличие углекислого газа может явиться причиной угара легирующих элементов.

Таблица 55. Режим аргонодуговой сварки встык плавящимся электродом высоколегированных сталей

Толщина металла, мм	Подготовка кромки	Число слоев	Диаметр свароч- ной про- волоки, мм	Сила сва- рочного тока, А	Скорость сварки, м/ч	Расход ар- гона, л/мин
Полуавтоматическая сварка						
4	Без разделки V-образная раз- делка	1	1,0—1,6	160—300	—	6—8
8		2	1,6—2,0	240—360	—	11—15
Автоматическая сварка						
2	Без разделки V-образная раз- делка под углом 50°	1	1	200—210	70	8—9
5		1	1	260—275	44	8—9
10	То же	2	2	330—440	15—30	12—17

Примерный режим аргонодуговой сварки встык плавящимся электродом высоколегированных сталей в нижнем положении приведен в табл. 55.

§ 46. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ РАЗНОРОДНЫХ И ДВУХСЛОЙНЫХ СТАЛЕЙ

Сварка разнородных сталей

В сварных конструкциях, применяемых в энергетическом и химическом машиностроении, атомной, ракетной технике; их отдельные части могут работать в разных условиях: при высоких температурах, в агрессивных средах. Они должны быть изготовлены из сталей, обладающих жаропрочностью и коррозионной стойкостью, в то время как другие части конструкции, работающие при нормальных температурах в неагрессивных средах, могут изготавливаться из недорогих обычных сталей.

Естественно, что в практике возникает необходимость сварки разнородных сталей в самых различных сочетаниях. Особую группу комбинированных конструкций из разнородных сталей составляют так называемые биметаллические конструкции, в которых из легированной стали

изготавливают не отдельные детали, а лишь их поверхностные слои, непосредственно примыкающие к агрессивной среде или к источнику интенсивного износа.

В практике эксплуатации комбинированных конструкций из аустенитной хромоникелевой стали с неаустенитными имелись случаи разрушений разнородных соединений. Основной причиной таких разрушений считают диффузию углерода из участков металла соединения, в котором углерода больше, в сторону металла с пониженным содержанием углерода, или в направлении такой структурной составляющей, которая более легко растворяет углерод, как например аустенит. Скорость диффузии увеличивается с повышением температуры и времени выдержки при этой температуре, а количество углерода, которое диффундирует через поверхность в единицу времени, пропорционально разности концентрации углерода в обеих сталях. Так, в комбинированном соединении из ферритной или перлитной стали с хромоникелевой аустенитной по линии сплавления наблюдается диффузия углерода из ферритной стали в аустенитную, в которой меньше углерода и больше хрома. В результате диффузии в ферритной или перлитной стали образуется обезуглероженный слой, а в пограничном участке аустенитной стали содержание углерода резко возрастает, достигая 1 % и более. При работе таких сварных соединений под нагрузкой разрушение может произойти либо по разупрочненному слою ферритной (перлитной) стали, либо по хрупкому подуглероженному слою в аустенитной стали. Явление диффузии углерода из неаустенитной стали в аустенитную наблюдается в производстве двухслойных сталей, при сварке этих сталей и при эксплуатации конструкций из двухслойной стали. Для уменьшения диффузии углерода при сварке разнородных сталей предлагается легирование неаустенитной стали более энергичными, чем хром, карбидообразователями — титаном, ниобием. Тогда, полагают, углерод будет связан в устойчивые карбиды и не будет диффундировать навстречу хрому. Или же рекомендуется предварительная облицовка кромок неаустенитной стали высоконикелевым сплавом типа X15Ni60. В этом сплаве углерод диффундирует крайне медленно.

Существенное влияние на качество комбинированных соединений оказывает различие физических свойств свариваемых сталей, что иногда являлось причиной разру-

шения сварных соединений разнородных сталей еще в процессе термической обработки. В комбинированных конструкциях используется большое разнообразие марок сталей как по химическому составу, так и по структуре; и в каждом случае требуется частное решение как по выбору сварочных материалов, так и по технологии сварки.

При изготовлении комбинированных конструкций из разнородных сталей могут быть использованы все способы электрической сварки плавлением и те же разделки кромок, что и для конструкций из стали одной марки. Но наибольшее распространение получила ручная дуговая сварка, как более маневренная и при которой можно получить меньшую долю участия основного металла в металле шва. Большое влияние на выбор сварочных материалов и технологии изготовления оказывает требование снижения до минимума или полного исключения диффузионных прослоек в зоне сплавления.

В образовании шва при сварке разнородных сталей, кроме электродного, участвуют еще два других основных металла, зачастую существенно отличающихся по составу и свойствам. Вследствие этого сварные соединения разнородных сталей имеют значительную химическую структурную и механическую неоднородность, что особо проявляется при многослойной сварке, так как по мере выполнения каждого последующего слоя химический состав его будет меняться в связи с изменением в нем доли участия основного и наплавленного металла со стороны каждой из свариваемых сталей. Это приводит к возникновению прослоек переменного химического состава, протяженность которых составляет 0,2—0,6 мм.

Если сварка сталей одного структурного класса производится электродами, обеспечивающими получение наплавленного металла того же структурного класса, то прослойки его не оказывают существенного влияния на работоспособность соединения. Если сварку сталей разных классов, например перлитного и аустенитного, выполняют сварочными материалами, обеспечивающими получение металла шва аустенитного класса, то у границы сплавления со стороны стали перлитного класса за счет перемешивания аустенитного металла с перлитным образуются прослойки переменного состава, содержащие 3—12 % Cr и 2—8 % Ni, имеющие мартенситную структуру и обладающие высокой твердостью. Это может явиться

причиной появления трещин в металле шва. Поэтому такие соединения следует выполнять сварочными материалами, которые обеспечивают получение наплавленного металла с большим запасом аустенита.

Сварка разнородных сталей одного структурного класса

Перлитные стали. На практике встречается необходимость сварки сталей одного структурного класса, но разного легирования. В таких случаях к швам не предъявляется особых требований, поэтому при выборе сварочных материалов и технологии сварки следует отдать предпочтение материалам и технологии, обычно применяемым для менее легированной стали (табл. 56).

При ручной сварке рекомендуется применять электроды с основным покрытием. Технологические режимы сварки и, прежде всего, температуру подогрева надо выбирать близкими к требуемым для более легированной стали. При необходимости исключить подогрев осуществляют предварительную наплавку кромок деталей на более легированной стали (с подогревом) электродами Э-42А.

Толщина наплавленного слоя должна исключать при сварке основного шва распространение температуры, превышающей $A_{с1}$, за пределы толщины наплавленного слоя.

Высокохромистые мартенситные, ферритные и ферритно-аустенитные стали. При сварке этих сталей выбор сварочных материалов должен ориентироваться на необходимость получения швов без трещин и без хрупких участков в них (табл. 57). Учитывая, что в этих сталях содержится большое количество карбидообразователя — хрома, ожидать заметного развития диффузионных прослоек в зоне линии сплавления не следует.

Режим подогрева и термообработки выбирают по ранее изложенным данным для стали более закаливающейся из входящих в рассматриваемое сочетание.

Аустенитные стали. При сварке таких сталей следует учитывать повышенную склонность аустенитных швов к образованию горячих трещин. Предупреждение их образования обеспечивается получением металла шва с аустенитно-ферритной структурой (табл. 58).

При сварке изделий из термически неупрочняемых сталей, предназначенных для работы в интервале уме-

Таблица 56. Рекомендации по выбору сварочных материалов для соединений из разнородных перлитных сталей

Марки свариваемых сталей	Метод сварки	Сварочный материал	Режим термообработки
Ст3, Ст10, 20	Ручная дуговая электродами	Э42А	Без отпуска или отпуск при температуре 630—650 °С
	Под флюсом	Св-08А	
	Ручная дуговая	Э42А	
	В углекислом газе	Св-08ГС или Св-08Г2С	
15ХМ; 12МХ; 20ХМЛ; 30ХМА	Ручная дуговая электродами	Э-ХМ	Отпуск при температуре 670—700 °С
	Под флюсом	Св-10ХМ	
	В углекислом газе	Св-08ХГСМА	
	В углекислом газе	Св-08ХГСМА	

Т а б л и ц а 57. Рекомендации по выбору сварочных материалов для разнородных высокохромистых сталей мартенситного, ферритного, ферритно-аустенитного классов

Условия работы	Марки свариваемых сталей	Метод сварки	Сварочный материал	Режим термообработки
Температура до 600 °С	12X13; 20X13; 08X13	15X11MФ; 15X12BMФ; 18X11MФБ; 15X11B2MФ	Э-12X13; Э-12X11NMФ Э-22X11NMФ Э-14X11NMФ	Отпуск при температуре 700—750 °С
		Под флюсом	Св-06X14 Св-08X14ГНТ	
		В углекислом газе	Св-08X14ГНТ	
Коррозионная среда и температура до 600 °С	15X25T; 14X17H2; 12X21H5T; X25H5TMФ	Ручная дуговая покрытыми электродами	Э-08X24H16ГБ; Э-10X25H13Г2; Э-28X24H16ГБ	Отпуск при температуре 700—750 °С; ускоренное охлаждение
		Под флюсом	Св-06X24H6ТАФМ Св-06X21H5T	
Коррозионная среда и температура до 300 °С	X17T; 5X25T; X28AH	Ручная покрытыми электродами	Э-08X24H6ТАФМ Э-10X25H13Г2; Э-28X24H16ГБ	Отпуск при температуре 700—850 °С; ускоренное охлаждение

ренных температур при требовании о снятии остаточных сварочных напряжений, термообработку можно не производить. Если же по условиям работы конструкции необходимо снятие остаточных сварочных напряжений, то следует провести стабилизацию при температуре 800—850 °С. В тех случаях, когда конструкция предназначена для работы при высоких температурах, проводят аустенизацию при температуре 1100—1150 °С.

Стали разнородного структурного класса. При сварке перлитных сталей с 12 %-ными хромистыми сталями для обеспечения наибольшей пластичности применения сварочные материалы перлитного класса. Для снижения размеров диффузионных прослоек перлитный наплавленный металл должен легироваться определенным количеством карбидообразующих элементов.

При сварке перлитных сталей с 17—28 %-ными хромистыми сталями следует применять сварочные материалы ферритно-аустенитного класса, обеспечивающие достаточную стабильность металла шва по этому классу даже при значительном проплавлении перлитной стали (табл. 59).

При сварке перлитных сталей с аустенитными всегда следует применять аустенитные сварочные материалы, обеспечивающие получение наплавленного металла с таким запасом аустенитности, чтобы с учетом участия в формировании шва перлитной стали обеспечить в высоколегированном шве аустенитную структуру (табл. 60). Последнее может быть подтверждено, если принять определенную долю участия каждого из металлов в металле шва, рассчитать химический состав наплавленного металла по формуле и по структурной диаграмме Шеффлера (см. рис. 67) определить структуру металла шва. Содержание $R_{ш}$ рассчитываемого элемента в металле шва определяем по формуле:

$$R_{ш} = R_0\gamma + R'\gamma' + R_0[1 - (\gamma + \gamma')] + \Delta R, \quad (152)$$

где R_0 — содержание рассчитываемого элемента в перлитной стали; γ — доля участия перлитной стали в металле шва; R' — содержание рассчитываемого элемента в аустенитной стали; γ' — доля участия аустенитной стали в металле шва; R_0 — содержание рассчитываемого элемента в металле, наплавленном данной маркой электродов или сварочной проволокой; $[1 - (\gamma + \gamma')]$ — доля участия наплавленного металла в металле шва; ΔR —

346 Таблица 58. Рекомендации по выбору сварочных материалов для сварки соединений из разнородных аустенитных сталей

Условия работы	Марки свариваемых сталей	Метод сварки	Сварочный материал	Структура шва
Неагрессивные среды	12X18H10T *	Ручная дуговая сварка покрытыми электродами	Э-04Х20Н9 Э-07Х20Н9	Аустенитно-ферритный
		Под флюсом	Св-04Х19Н9	
		В углекислом газе	Св-04Х19Н9С2	
		Ручная дуговая сварка покрытыми электродами	Э-02Х21Н10Г2 Э-06Х22Н9	
Температура выше 300 °С	12X18H10T *	Под флюсом	Св-05Х19Н9Ф3С2 Св-08Х19Н9Ф2С2	Аустенитно-ферритный
		Ручная дуговая сварка покрытыми электродами	Э-06Х22Н9; Э-02Х21Н10Г2	

Температура до 700 °С	09Х14Н18М2БР **	1Х16Н13М2Б; 20Х23Н18; Х25Н13	ми электродами	Э-02Х20Н14Г2М2; Э-06Х19Н11Г2М2	Аустенитно-карбидный
Коррозионные среды	12Х18Н10Т; 10Х17Н3М2Т	1Х15Н35В3Т; Х15Н35В5ТР	Под флюсом	06Х15Н3517В7М3Т	Аустенитный
Высокие температуры	12Х18Н9Т	09Х14Н18132БР	Ручная	Э-08Х24Н6ТАФМ	Ферритно-аустенитный
		Х25Н35В3Т		Э-27Х15Н35В3Г2Б2Т	Ферритно-карбидный
		Х20Н80Т2Ю		Э-27Х15Н35В3Г2Б2Т	Аустенитно-карбидный
				Э-11Х15Н25М6АГ2	Аустенитный

* Запас аустенитности сталей Ni/Cr ≤ 1. ** Запас аустенитности сталей Ni/Cr > 1.

* Запас аустенитности сталей Ni/Cr ≤ 1. ** Запас аустенитности сталей Ni/Cr > 1.

Т а б л и ц а 59. Рекомендации по выбору сварочных материалов для разнородных соединений сталей перлитного класса с высокохромистыми

Предельная температура работы изделия, °С	Марки свариваемых сталей	Метод сварки	Сварочный материал	Температура отпуска, °С
300—350	20; 15к; Ст3	Ручная	Э-09ХМ	650—680
		Под флюсом	Св-08ХМ	
400—450	15ХМ; 12ХМ; 30ХМ	Ручная	Э-09Х1МФ	
500—520		Под флюсом	Св-08ХМФА	650—700
		В углекислом газе	Св-08ГСМФА	
	08Х13; 12Х13 20Х13 15Х11МФ 15Х12ВМФ; 15Х11МФБ	Ручная	Э-09Х1МФ	
580	12Х1МФ; 12Х1М1Ф	В углекислом газе	Св-08ХГСМФА	700—720
			Э-08ХМФ*	
			Э-09Х1МФ**	
300	Х5М; Х5МФ	Ручная	Э-10Х5МФ	700—740
	Ст3; 15ХСНД; 14ХГС		Э-08Х24Н6ТАФМ	
			Э-10Х25Н13Г2	

* Электрод для облицовки. ** Электрод для сварки.

Т а б л и ц а 60. Рекомендации по выбору сварочных материалов для разнородных сварных конструкций соединений перлитных и мартенситных сталей с аустенитными и аустенитно-ферритными

Предельная температура, °С	Марки свариваемой стали	Метод сварки	Сварочный материал
350	20; 15к; Ст3; 15ХСНД	Ручная	Э-10Х25Н13Г2 Э-06Х19Н11Г2М2
400	12МХ; 15ХМ; 30ХМ; 20ХМЛ		Св-07Х25Н13*; Св-08Х20Н9Г7Г*; Св-08Х25Н12Ю**; Св-06Х20Н11М3ТВ**
520	12Х1МФ; 12Х1М1Ф		
580	Х5М; Х5МФ; 25Х3ВМФ; 15Х2М2ФБС	Под флюсом и аргонсодуговая	Э-11Х15Н25М6АГ2; Э-08Х24Н6ТАФМ
350	20; 15к; Ст3; 15ХСНД	Ручная	

* При сварке среднеуглеродистых сталей с аустенитными. ** При требованиях стойкости против межкристаллитной коррозии.

переход данного элемента из покрытия или флюса в шов или его выгорание.

Большой запас аустенита металла шва делает маловероятным образование мартенситной структуры в корневых швах и слоях, примыкающих к перлитной стали. Термообработке такие соединения обычно не подвергают. Режимы термообработки, улучшающие свойства зоны термичного влияния перлитной стали, могут привести к ухудшению свойств аустенитной стали.

При изготовлении жестких узлов из перлитной закаливающейся стали большей толщины с аустенитной в процессе отпуска или эксплуатации возможны хрупкие разрушения в зоне сплавления перлитной стали с аустенитным швом. Наряду с применением аустенитных электродов или проволок с большим запасом аустенита для заполнения шва этих сталей, часто выполняют еще предварительную облицовку свариваемых кромок перлитной стали высоконикелевыми аустенитными электродами, особенно при использовании разделок с развитой границей сплавления.

Толщина облицовочного слоя должна быть не менее 8—9 мм. Наплавку следует производить в несколько слоев валиками небольшого сечения.

В тех случаях, когда сварку основного шва намечается вести электродами аустенитно-ферритного класса Э-10Х25Н3Г2; Э28Х24Н16Г6 или Э-09Х19Н11Г3М2Ф. Для повышения прочности зоны сплавления первый слой облицовки выполняют электродами типа Э-09Х15Н25МБТ2Ф, а последующие слои — электродами, применяемыми для заполнения основного шва. Общая толщина слоя должна быть в пределах 9 мм.

Сварка двухслойной стали

Двухслойные стали представляют собой низкоуглеродистую или низколегированную сталь толщиной свыше 6 мм, покрытую слоем (1,5—6 мм) высоколегированной стали.

Применение двухслойной стали вместо высоколегированной позволяет снизить расход высоколегированной стали до 70 % от массы изделия. Одним из наиболее распространенных типов конструкций, изготавливаемых из двухслойной стали, являются сосуды различного назначения с внутренним слоем из коррозионно-стойкой и

несущим из низкоуглеродистой или низколегированной стали. В практике применяются три метода получения плакированного слоя:

1) футеровка листами из коррозионно-стойкой стали внутренней поверхности сосуда;

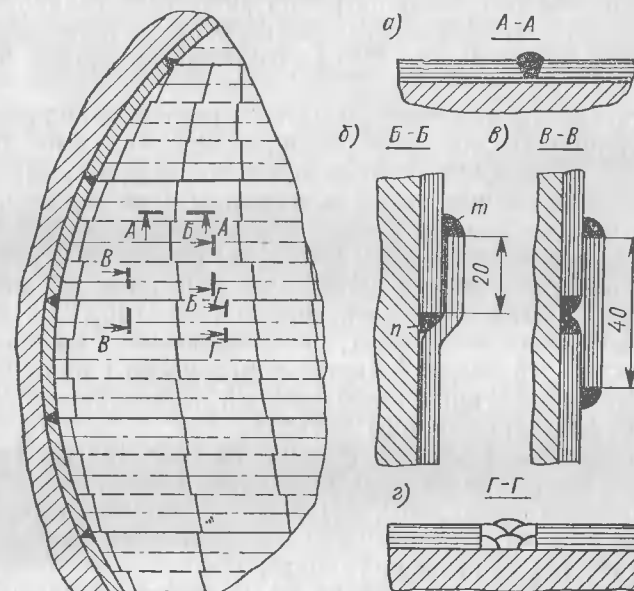


Рис. 142. Схематизированное изображение части корпуса шаровой регенерационной цистерны, ее типовые соединения и их условные обозначения

2) применение листов двухслойной стали;

3) наплавка коррозионно-стойкого слоя.

Футеровка применяется в конструкциях, не испытывающих воздействия значительных температур или динамических напряжений, так как при этом связь между защитным и основным нагруженным слоем осуществляется лишь в отдельных участках, как это имеет место при изготовлении шаровой регенерационной цистерны из стали марки 20К толщиной 26 мм с облицовкой из стали марки 10Х17Н13М2Т толщиной 2 мм (рис. 142).

Технологический процесс футеровки предусматривает разбивку облицовочной поверхности цистерны на 20 контрольных зон, каждая из которых состоит из двух-

трех карт. Крепление деталей облицовки к корпусу цистерны и между собой в процессе сборки обычно производится прихватками, выполняемыми электродами типа Э-10Х25Н13Г2 марки УОНИ-13НЖ2. А поперечные швы (А—А), соединяющие детали карт в пределах контрольных зон, следует выполнять аргонодуговой сваркой неплавящимся вольфрамовым электродом с применением присадки из проволоки Св-04Х19Н1М3 диаметром 3 мм (рис. 142, а).

Эти соединения должны быть совершенно плотными и стойкими против межкристаллитной коррозии. Продольные соединения карт в пределах контрольных зон свариваются между собой внахлестку (рис. 142, б), но для этого продольные кромки карт, прилегающие к корпусу, приваривают к нему вручную прерывистым швом *п* (для создания условий проведения испытаний на непроницаемость всей зоны (электродами типа Э-10Х25Н13Г2), а продольную кромку карт, располагающуюся на поверхности соседней смежной карты, приваривают к ней сплошным швом *т* аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом без присадочного металла.

Поперечные стыковые соединения (рис. 142, в), разделяющие контрольные зоны, выполняют сплошными швами электродами типа Э-10Х25Н13Г2, а приварку накладок на эти швы — неплавящимся вольфрамовым электродом в аргоне без присадочного материала.

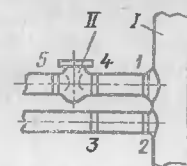
Для плотного прилегания облицовки к корпусу предусмотрено выполнение нахлесточных соединений по отверстиям шириной 10 мм и длиной 60 мм (рис. 142, г), расположенным так, чтобы расстояние между точками крепления в любом направлении не превышало 350 мм. Выполняются нахлесточные соединения в удлиненных отверстиях в четыре-шесть проходов, нижние проходы — электродами типа Э-10Х25Н13Г2, верхние — электродами типа Э-08Х17Н8М2.

Стоимость облицовочной шаровой цистерны ниже стоимости такой же цистерны, изготовленной из двухслойной стали марок 16ГС + 08Х17Н13М2Т на 38 % (по данным треста Союзбуммонтаж). Но надо полагать, что по мере увеличения выпуска двухслойной стали, снижения ее стоимости и увеличения ее стойкости к межкристаллитной коррозии, вероятно, станет экономически и технологически более выгодным изготавливать шаровые емкости из двухслойной стали.

Основные особенности сварки двухслойной стали рассмотрим на примере выполнения стыковых соединений при толщине основного слоя из низкоуглеродистой стали 16 мм и плакированного слоя толщиной 4 мм из стали марки 08Х18Н10Т. При заготовке деталей под сварку подготовка кромок стыковых соединений должна производиться на кромкострогальных станках.

Возможно применение ручной и механизированных способов сварки с применением для основного слоя сварочных материалов, обеспечивающих механические свойства, близкие к свойствам металла основного слоя. Для механизированных способов сварки легированного слоя

Рис. 143. Схема части петли трубопровода ГЦК: I — корпус реактора; II — задвижка; 1—5 — монтажные стыки



из стали марки 08Х18Н10Т следует применять сварочную проволоку, а для ручной сварки — электроды, содержащие относительно большее количество легирующих примесей (Cr, Ni), чтобы получить наплавленный металл (с учетом его разбавления металлом основного слоя), близкий к химическому составу легированного слоя, за исключением случаев сварки плакированного слоя из стали марок 08Х12, 06Х13, когда это требование не выдвигается, так как плакированный слой в этом случае сваривается аустенитными электродами.

Технологию сварки труб из плакированной стали марок 10ГН2МФА и ЭИ-898 рассмотрим применительно к сварке трубопровода главного циркуляционного контура, соединяющей основное оборудование первого контура атомной электростанции (реактор, парогенераторы) и главные циркуляционные насосы.

Главный циркуляционный трубопровод реактора ВВЭР-1000 состоит из четырех петель (15 сварных стыков) и собирается из труб диаметром 850 мм (рис. 143). Сварка трубопровода осуществляется в два этапа. На первом этапе укрупняются блоки. Из 44 стыков при укрупнении выполняют 8—16 стыков. Стыки сваривают в следующей последовательности. Сначала снаружи стыка выполняют аргонодуговой сваркой корень шва (рис. 144) с присадочной проволокой Св-08Г2С. Затем корень шва

просвечивают и исправляют дефекты. Далее стык подогревают до 150—250 °С и заполняют разделку электродами ПТ-30. Сварка ведется непрерывно до полного заполнения разделки (до 5 сут). Для более эффективного использования рабочего времени одновременно сваривают два стыка, т. е. в период механической зачистки слоя слесарями сварщики сваривают слой на другом, рядом расположенном стыке.

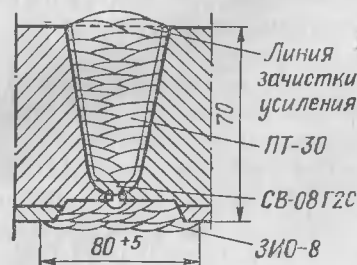


Рис. 144. Схема заполнения шва стыка трубопровода ГЦК ($P_y = 850$)

на сохраняться и во время вынужденных перерывов. После окончания сварки перлитной части стыка вы-

Предварительный и сопутствующий подогрев стыков, термический отдых и термическая обработка выполняются индукционным способом. Весь период сварки температура стыка должна

Таблица 61. Подготовка кромок и последовательность выполнения стыковых швов соединения из двухслойной стали

Сварка	Форма подготовки	Последовательность заполнения
Ручная		а — многопроходная сварка основного шва, без проплавления облицовочного слоя; б — вырубка корня шва; в — сварка облицовочного слоя
Автоматическая		а — автоматическая сварка основного шва; б — сварка облицовочного слоя; в — сварка основного слоя

полняются операции термического отдыха, контроля и исправления дефектов. Заварку выборок после удаления дефектов необходимо производить с предварительным и сопутствующим подогревом.

По окончании сварки перлитной части стыка соединения подвергают местной термической обработке по режиму высокого отпуска. После сдаточного контроля перлитной части стыка выполняют сварку плакированного слоя. Сварка ведется изнутри трубопровода электродами марки ЗИО-8 типа Э10Х25Н13Г2. Затем выполняется зачистка шва и сдаточный контроль плакированного слоя.

Некоторые возможные формы подготовки кромок и последовательность заполнения швов стыковых соединений двухслойной стали приведены в табл. 61.

ГЛАВА X. НАПЛАВКА ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ И СВАРКА ЧУГУНА

§ 47. НАПЛАВКА ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

Большое количество деталей машин, механизмов и инструмента выходит из строя в связи с износом вследствие истирания, эрозии и кавитации.

Современная техника располагает различными методами повышения срока службы и упрочнения деталей, подверженных интенсивному износу, но одним из наиболее рациональных методов является наплавка. Наплавку твердыми сплавами сейчас производят не только при восстановлении изношенных, но и при изготовлении новых деталей машин и механизмов. Поэтому объем наплавочных работ очень велик и непрерывно возрастает, вместе с этим растет номенклатура используемых материалов и разнообразие способов наплавки.

Характеристика наплавочных материалов и способов наплавки

Материалы для наплавки по способу их производства обычно подразделяют на следующие основные группы: порошкообразные смеси, литые твердые

сплавы и электродные материалы. К ним относятся электроды для ручной дуговой наплавки (ГОСТ 10051—75), литые, трубчатые порошковые электроды, а также материалы для механизированных способов наплавки: проволока и лента сплошная, проволока и лента порошковые и др.

Преимуществами ручных способов наплавки твердых сплавов является возможность использования обычного сварочного оборудования и возможность выполнения наплавки деталей сложной конфигурации. К недостаткам ручных способов наплавки можно отнести невысокую производительность, повышенные требования к квалификации сварщиков и тяжелые условия труда.

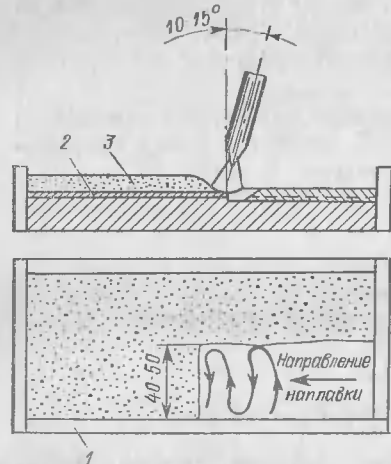


Рис. 145. Наплавка порошкового материала угольной дугой

Порошкообразные наплавочные материалы и технология их наплавки. Порошкообразные наплавочные материалы представляют механическую смесь зерен металлов, ферросплавов и металлических соединений с углеродом. Химический состав некоторых порошкообразных наплавочных материалов приведен в табл. 62.

Наплавка порошкообразных наплавочных материалов может производиться угольной дугой на постоянном токе прямой полярности или током высокой частоты на очищенную от загрязнений поверхность.

При наплавке угольной дугой (рис. 145) кромки детали подформовываются пластинами 1 из графита или меди; на наплавленную поверхность насыпается слой прокаленной буры 2 высотой 0,2—0,3 мм и слой порошкообразного материала 3, толщина которого после уплотнения должна быть в два раза больше высоты наплавки, которая обычно равна 2—3 мм. Затем дуга возбуждается на основном металле, переносится на порошкообразный материал, и при поступательно-зигзагообразном движении электрода по всей ширине наплавляемой полосы

производится одновременное расплавление шихты и основного материала, который после охлаждения образует слой твердого сплава. При необходимости получения более высокой наплавки, наплавка ведется в несколько слоев. Для уменьшения вероятности образования трещин и уменьшения остаточных деформаций детали сложной формы рекомендуется подогреть до 500 °С. По окончании наплавки следует обеспечить медленное охлаждение деталей, для чего их помещают в горячий песок, покрывают асбестом и т. д.

При наплавке токами высокой частоты необходимая тепловая энергия в нагреваемом изделии получается за счет электромагнитного поля, создаваемого в индукторе, к которому подводится ток от высокочастотного генератора. Материал для наплавки подготавливается в виде пасты, брикета или смеси порошкообразного материала с флюсом, обычно бурой.

Наплавка токами высокой частоты имеет ряд преимуществ перед другими методами наплавки:

1) малый нагрев и небольшая глубина проплавления основного металла;

2) высокая производительность процесса и большие возможности автоматизации.

В последние годы для получения износостойкой наплавки используется механическая смесь мелких зерен борида хрома с железным порошком (КБХ). Этот порошкообразный материал значительно дешевле подобных ма-

Таблица 62. Химический состав некоторых порошкообразных наплавочных материалов и твердость одной наплавки

Марка	Массовое содержание элементов, %						HRA
	C	Si	Mn	Cr	W	Fe	
Сталлит	8—10	3,0	13—17	16—20	—	Остальное	77
Вокар	9,5—10,5	0,5	—	—	85—87	До 2,0	84
Виском-9	5,8—6,2	—	9,5—10,5	3,5—3,8	—	Остальное	78,5
Релит	5	—	—	—	95	—	88

Таблица 63. Химический состав некоторых литых твердых спла

Тип сплава	Марка	Массовое содержание элементов, %		
		C	Si	Mn
Стеллиты	B2K B3K	1,8—2,5 1,0—1,5	1,0—2,0 2,3—2,5	1,0—1,2 —
Стеллитоподобные	Сормайт-1 Сормайт-2	2,5—3,3 1,5—2,0	2,8—3,5 1,5—2,2	≤1,5 ≤1,0

териалов на базе карбидов вольфрама и мало уступает ему в отношении износостойкости. Так, порошкообразный материал на базе борида хрома, обеспечивающий наплавленный металл X35P5 (0,1 % C, 7,7 % B, 35 % Cr, остальное Fe) имеет твердость 80—85 HRA.

Электроды для дуговой наплавки твердых сплавов. К электродным твердым сплавам для ручной дуговой наплавки относятся сплавы, получаемые за счет расплавления сплошного электродного стержня, в том числе и стержней, получаемых отливкой в кокиль, а также трубчатых электродов со стальной оболочкой, имеющих сердцевину и толстое покрытие. Легирование металла в этих случаях может осуществляться тремя способами:

1) через толстое покрытие электрода, сердцевину и покрытие порошкового электрода (стержень и оболочка в этом случае изготавливаются из низкоуглеродистой стали);

2) через стержень (покрытие в этом случае шихтуется из шлакообразующих и газозащитных материалов);

3) через стержень и покрытие — это так называемое комбинированное легирование, когда стержень изготавливается из стали, содержащей лишь некоторые легирующие элементы, а необходимая степень легирования наплавленного металла достигается за счет введения остальной части легирующих элементов в покрытие. Различные типы электродов для дуговой наплавки твердых сплавов, изготовленные в соответствии с ГОСТ 10051—75, обеспечивают все три способа легирования металла шва.

Увеличение степени легирования через покрытие приводит к заметному увеличению коэффициента покрытия. Так, k_d электродов марки T-620 составляет 1,65, что создает определенные трудности при изготовлении и производстве наплавочных работ. Этого недостатка лишены

ВОВ

Массовое содержание элементов, %					S	P
Cr	W	Ni	Co	Fe	не более	
27—33 28—32	13—17 4,0—5,0	2,0—2,2 2,0—2,2	47—55 58—62	Остальное	0,07	0,08
25—31 13—17,5	—	3—5 1,3—2,2	—			

электроды на базе литых твердых сплавов и порошковые электроды.

Электроды со стержнями из литых твердых сплавов. К литым твердым сплавам относятся стеллиты марок B2K и B3K, а также стеллитоподобные их заменители сормайт-1 и сормайт-2 (табл. 63). Получают стеллиты путем сплавления в индукционных печах при температуре 1400—1600 °C из шихты, состоящей из кобальта, хрома, вольфрама, битого стекла, древесного угля или кокса. Разливкой расплава в кокиль получаем стержни диаметром 4—7 мм длиной 250—300 мм.

Стеллиты используются для наплавки на уплотнительные и трущиеся поверхности арматуры, изготовленной из антикоррозионной и углеродистой стали, работающей в агрессивных средах и в условиях повышенных температур (до 600 °C). Наплавка производится толстопокрытыми электродами марки ЦН-2 (имеющими стержень из стеллита B3K), соответствующими наплавочными электродами типа Э-190K62X29B5C2. Наплавку следует производить в нижнем положении постоянным током обратной полярности с минимальным проплавлением основного металла с предварительным и сопутствующим подогревом массивных деталей до 700—800 °C. Сварочный ток подбирается из расчета 30 А на 1 мм диаметра стержня.

Железохромоуглеродистый сплав сормайт-1 является заэвтектическим сплавом, приближающимся по структуре к высокохромистым нержавеющим чугунам. Практически не поддается термической обработке. Сормайт-2 — доэвтектический сплав, поддается термической обработке и после отжига можно производить обработку наплавленного металла обычным режущим инструментом. Сор-

майты обладают износостойкостью, жаростойкостью и устойчивостью к коррозии. Наплавка сормайтотом производится толстопокрытыми электродами марок ЦС-1 и ЦС-2. Первая марка соответствует типу Э-300Х28С4Н4 и предназначена для наплавки на быстроизнашивающиеся детали машин, станков, металлургическое оборудование и нефтяную арматуру. Вторая марка ЦС-2 предназначена для наплавки штампов, пуансонов, ножей и др.

Порошковые электроды. Эти электроды имеют стержень из порошковой проволоки и толстое, обычно основное, покрытие. Меняя состав порошкового наполнителя, можно получить наплавленный металл различного состава и свойств. Эти электроды маркируются буквами ПЭ (порошковые электроды), затем следует обозначение марки металла, получающегося в результате наплавки, по принятой системе маркировки сталей. Например, электроды ПЭ-6Х3В10 при наплавке ими на сталь марки 3Х2В8 обеспечивают получение наплавленного металла следующего химического состава: 0,5 % С, 3 % Сг, 10,4 % W, 0,25 % V. Такой металл наплавки соответствует стали марки 5Х3В10. Твердость этого металла после закалки и отпуска при температуре 580 °С — 63—64 HRC₀.

Порошковые электроды более производительны, чем стержневые и имеют коэффициент наплавки 11—12 г/(А·ч). Применяются также порошковые электроды марок ПЭ-11Х4В10, ПЭ-Р9 и др. В процессе наплавки порошковым электродом наполнитель плавится быстрее, чем оболочка электрода. Это улучшает защиту легирующих элементов расплавленного металла от окружающего воздуха и коэффициент их усвоения возрастает: для марганца он равен 0,85, для углерода 0,9.

В тех случаях, когда металл наплавки и зона термического влияния склонны к закалке на воздухе, наплавку следует производить с предварительным и сопутствующим подогревом от 300 до 600 °С в зависимости от степени чувствительности стали к термическому циклу наплавки. По окончании наплавки следует обеспечить медленное охлаждение деталей.

§ 48. МЕХАНИЗИРОВАННЫЕ СПОСОБЫ НАПЛАВКИ

Механизированные способы наплавки обеспечивают более высокое качество наплавленных поверхностей; наплавленный металл при этом получается более

плотным, содержание в нем вредных примесей гораздо меньше, чем при ручных способах наплавки.

В промышленности применяются следующие способы механизированной наплавки: автоматическая под флюсом, автоматическая вибродуговая и др.

Автоматическая наплавка под флюсом

Эта наплавка может производиться стальной сварочной проволокой, порошковой проволокой, ленточным электродом, порошковой лентой, под плавными или керамическими флюсами и др.

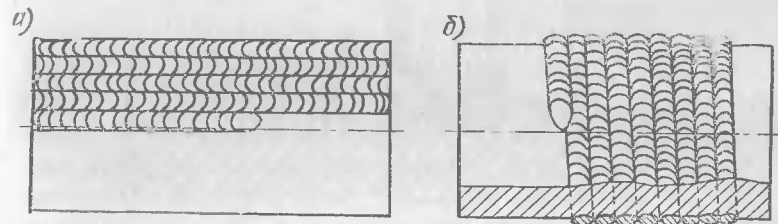


Рис. 146. Возможные методы наплавки цилиндрического изделия

В связи с тем, что автоматическая наплавка широко применяется для наплавки цилиндрических поверхностей, как, например, валков прокатных станов, рассмотрим процесс наплавки цилиндрического изделия. Наплавка цилиндрического изделия может производиться по образующей (рис. 146, а) или по винтовой линии (рис. 146, б). В последнем случае обеспечивается непрерывность процесса, более высокое качество и относительно меньшие деформации. Силу тока и диаметр проволоки выбирают в зависимости от диаметра наплавляемой детали, с учетом толщины стенки детали в месте наплавки.

Автоматическая одноструйная наплавка под флюсом сталей, особенно на повышенных режимах, приводит к глубокому проплавлению основного металла. Происходит сильное разбавление наплавленного металла основным. Уменьшить глубину проплавления и долю участия основного металла в наплавленном снижением плотности тока одноструйной наплавки не всегда представляется возможным. Поэтому был предложен способ двухструйной наплавки под флюсом.

Двухструйная наплавка под флюсом не только уменьшает глубину проплавления, но и увеличивает тепловую

энергию, т. е. обеспечивает как бы предварительный нагрев. Для этого в зону наплавки одновременно подаются две электродные проволоки, расположенные последовательно одна за другой (рис. 147).

Двухдуговую наплавку обычно производят проволокой диаметром 1,6—2 мм, что имеет ряд преимуществ перед двухдуговой наплавкой проволокой диаметром 4—5 мм; упрощается конструкция автомата для наплавки, облегчается подача проволоки к месту наплавки, а также

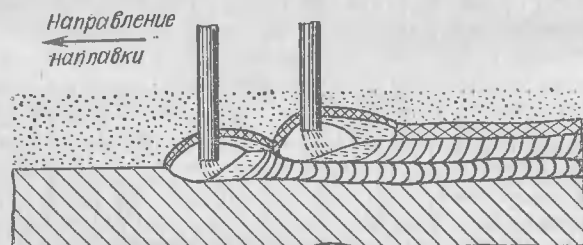


Рис. 147. Двухдуговая наплавка под флюсом

появляется возможность использовать маломощные источники питания дуги. Наплавка производится под флюсом мелкой грануляции. Технология и режимы наплавки принимаются с учетом того, чтобы при наплавке закаливаемых сталей скорость охлаждения металла зоны термического влияния была небольшой, для чего иногда применяют предварительный и сопутствующий подогрев, исключающий возможность образования закалочных трещин.

Механизированная наплавка порошковой проволокой

При наплавке порошковой проволокой наплавленный металл легируется за счет материалов, входящих в состав шихты порошковой проволоки. Процесс наплавки порошковой проволокой почти не отличается от процесса наплавки углеродистой или легированной проволокой под обычным флюсом. При наплавке порошковой проволокой дуга горит между изделием и металлической оболочкой. Шихта плавится быстрее, в результате чего образуется металлический чехольчик, который уменьшает выгорание легирующих элементов и способствует лучшему

переходу их в наплавленный металл. Дуга горит устойчиво при плотности тока 75—100 А/мм². При постоянной скорости подачи порошковой проволоки требующийся состав оболочки и шихты может быть рассчитан в зависимости от заданного химического состава наплавленного металла.

Наплавку высоколегированных сталей порошковой проволокой производят под низкокремнистыми флюсами марок ФЦЛ-2 и АН-20, бескислородными флюсами БКФ-1, БКФ-2 или флюсами 48-ОФ-6, 48-ОФ-7, АН-70.

Автоматическая наплавка под флюсом ленточным электродом

Основана она на применении специального ленточного электрода, который можно рассматривать как большое количество обычных электродов, расположенных в один ряд (рис. 148, а).

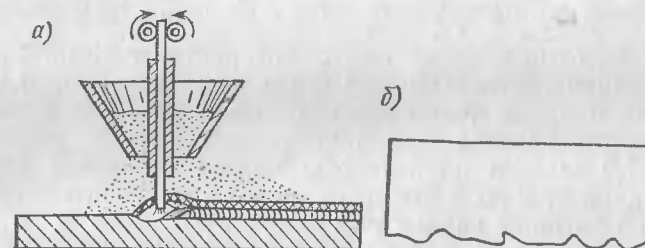


Рис. 148. Наплавка ленточным электродом и оплавление конца ленточного электрода

Коэффициент плавления ленточного электрода выше коэффициента плавления электродной проволоки на 20—30 %. Это объясняется тем, что в процессе плавления ленты горит то одна, то несколько дуг, которые, перемещаясь по ширине ленты с одного места на другое, выплавляют отдельные ее участки, образуя «пилообразную» форму торца ленты (рис. 148, б). В момент возбуждения и в процессе горения дуги между нерасплавившимися участками ленты и расплавленным металлом сварочной ванны плотность тока в десятки и сотни раз больше, чем средняя плотность тока в ленточном электроде. Известно, что с увеличением плотности тока в электроде скорость его плавления и коэффициент сплавления

увеличиваются. В связи с этим часто повторяющиеся увеличения плотности тока на отдельных участках ленты и приводят к заметному увеличению коэффициента плавления ленточного электрода.

При увеличении ширины ленты ширина валика возрастает, глубина проплавления уменьшается от 2,8 до 0,9 мм, а доля участия основного металла в металле шва

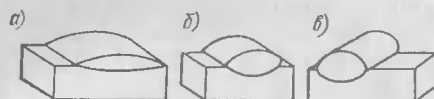


Рис. 149. Изменение ширины наплавки в зависимости от угла разворота головки: а — $\alpha = 0^\circ$; б — $\alpha = 60^\circ$; в — $\alpha = 90^\circ$

уменьшается с 19 до 10 %. Ниже приведены оптимальные данные параметров режима наплавки ленточным электродом:

Плотность тока, А/мм ²	20—40
Напряжение, В	28—34
Скорость подачи электродной проволоки, м/ч	6—14
Толщина электродной ленты, мм	Не менее 0,4

В настоящее время выпускают ленту холодного проката шириной от 20,0 до 100 мм и толщиной от 0,4 до 1,0 мм и литые ленты большей толщины. Проплавление основного металла при хорошо подобранных режимах 0,5—1,5 мм. За один проход можно наплавить валик толщиной от 2 до 8 мм. Доля участия основного металла в наплавленном валике составляет от 5 до 10 %. Коэффициент наплавки будет в пределах 15—20 г/(А·ч). Способ эффективен для наплавки больших поверхностей однотипных деталей.

Порошковая лента позволяет за счет изменения состава шихты в широких пределах изменять химический состав наплавленного металла. Для наплавки лентой применяются специальные автоматы или автоматы типа А-384, АБС, АДС-1000-2 с измененной сварочной головкой, имеющей постоянную скорость подачи ленты.

В связи с тем, что часто возникает необходимость наплавливать детали разной ширины, не соответствующей имеющейся ширине ленты, было разработано устройство, позволяющее производить разворот головки на разные углы, что приводит к изменению ширины наплавки (рис. 149).

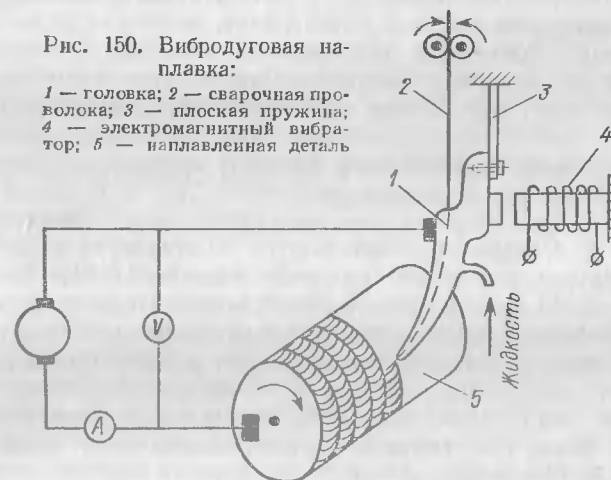
Наплавка в защитном газе позволяет механизировать процесс в любом пространственном положении наплав-

ляемой плоскости. В качестве защитных газов используются аргон, гелий, углекислый газ и др.

Аргон применяется для наплавки жаропрочных, коррозионно-стойких и других сталей и цветных металлов; углекислый газ для наплавки углеродистых и некоторых марок легированных сталей. Автоматическая наплавка в среде CO_2 в 3—4 раза повышает производительность и на 30—40 % снижает себестоимость восстановления деталей по сравнению с ручной дуговой наплавкой.

Рис. 150. Вибродуговая наплавка:

1 — головка; 2 — сварочная проволока; 3 — плоская пружина; 4 — электромагнитный вибратор; 5 — наплавленная деталь



Вибродуговая наплавка представляет собой разновидность электрической дуговой наплавки металлическим электродом. Вибрация электрода, обуславливая многократные короткие замыкания сварочной цепи, улучшает стабильность процесса за счет частых возбуждений дуговых разрядов в моменты разрыва цепи и способствует переносу электродного металла малыми порциями. Это позволяет получать небольшую глубину проплавления и возможность наплавливать детали малого диаметра. Наплавка производится специальной головкой 1 (рис. 150), которая в процессе наплавки периодически замыкает и размыкает электрическую цепь в месте контакта электродной проволоки 2 с наплавливаемой деталью 5. Происходит это потому, что конец проволоки постоянно вибрирует. Головка для наплавки обычно монтируется на токарном или токарно-винторезном станке.

При наплавке в плавильную зону подаются: 3—4 %-ный водный раствор кальцинированной соды, 20—30 %-ный раствор технического глицерина и др. Они обеспечивают ионизацию дугового промежутка и более быстрый отвод теплоты, что позволяет получать более высокую твердость наплавленного слоя при незначительных остаточных деформациях.

Амплитуда вибрации электродной проволоки обычно находится в пределах 0,75—1,0 диаметра электрода. Коэффициент плавления $\alpha_p = 9 \div 12$ г/(А·ч), а коэффициент наплавки $\alpha_n = 8 \div 10$ г/(А·ч).

Способ эффективен при наплавке цилиндрических поверхностей малых диаметров. Для восстановления размеров применяют также электрическую металлизацию.

§ 49. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ЧУГУНА И ЕЕ ОСОБЕННОСТИ

Чугунами называются железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода свыше 2,0 %.

Обычный чугун представляет собой железоуглеродистокремниевый сплав, содержащий углерода от 2,5 до 4 %, кремния от 1 до 5 % в сочетании с различными количествами марганца, серы и фосфора; иногда при этом имеются один или несколько специальных легирующих элементов вроде никеля, хрома, молибдена, ванадия, титана и пр.

Чугун является дешевым, обладающим хорошими литейными свойствами сплавом, который благодаря еще ряду особых свойств нашел широкое применение в народном хозяйстве, особенно в машиностроении.

В зависимости от состояния углерода в сплаве различают два основных вида чугуна: белый и серый чугун.

Серые чугуны получили большое распространение; со сваркой их приходится встречаться главным образом при исправлении брака чугунного литья и при ремонте.

Структура чугуна, его физические и механические свойства зависят от скорости охлаждения и его химического состава. При одинаковом химическом составе и прочих равных условиях высокая скорость охлаждения способствует образованию в чугуне цементита, т. е. получению белого чугуна. Замедленное охлаждение, напротив, вызывает выделение углерода в состоянии графита с получением серого чугуна. Промежуточные скорости

охлаждения дают различные переходные структуры металлической части: цементитно-перлитную, перлитную, перлитно-ферритную, ферритную.

Все примеси чугуна по своему влиянию на цементит делят на две группы: графитообразующие, способствующие образованию графита, и карбидообразующие, задерживающие выделение графита. Рассмотрим влияние некоторых примесей.

Кремний является после углерода наиболее важной примесью чугуна и относится к графитизирующим примесям. При содержании кремния выше 4,5 % практически весь углерод выпадает в виде графита. Сера образует легкоплавкие эвтектики и является активным карбидообразователем, что увеличивает хрупкость чугуна. Поэтому содержание серы в чугуне строго ограничивается (не более 0,15 %). Марганец, как и в стали, снижает содержание серы в чугуне; при содержании в чугуне до 0,8 % действует как графитизатор, выше 1 % — как слабый карбидообразователь; дальнейшее увеличение содержания марганца усиливает его карбидообразующее действие. Фосфор придает расплавленному чугуну жидкотекучесть и образует сложную фосфидную эвтектику, повышающую твердость и хрупкость чугуна.

Твердость является важной характеристикой чугуна; она зависит от структуры, легирующих примесей и размера графитных включений. Наименьшую твердость имеют ферритные чугуны, в которых почти весь углерод находится в свободном состоянии, перлитный чугун с пластинчатым графитом имеет 220—240 НВ, чугун с мартенситной металлической основой имеет 400—500 НВ, а структура цементита 750 НВ. Чем больше размеры графитных включений, тем меньше твердость чугуна.

При выборе способа сварки чугуна необходимо учитывать следующие особенности:

1) высокая его хрупкость при неравномерном нагреве и охлаждении может привести к появлению трещин в процессе сварки;

2) ускоренное охлаждение приводит к образованию отбеленной прослойки в околошовной зоне и затрудняет его дальнейшую механическую обработку;

3) сильное газообразование в жидкой ванне может привести к пористости сварных швов;

4) высокая жидкотекучесть чугуна вызывает необходимость в ряде случаев к подформовке.

Чугунные детали, работающие длительное время при высоких температурах, почти не поддаются сварке. Это происходит в результате того, что под действием высоких температур (300—400 °С и выше) углерод и кремний окисляются, и чугун становится очень хрупким. Чугун с окисленным углеродом и кремнием называют горелым.

Также плохо свариваются чугунные детали, работающие длительное время в соприкосновении с маслом и керосином. В таких случаях поверхность чугуна как бы пропитывается маслом и керосином, которые при сварке сгорают и образуют газы, способствующие появлению сплошной пористости в сварном шве.

Различают два способа сварки чугуна. *Холодная сварка чугуна* — это сварка без предварительного нагрева изделия. *Горячая сварка чугуна* — это такой способ, при котором осуществляется предварительный и сопутствующий нагрев изделия до 600—700 °С с последующим медленным охлаждением. Такой процесс уменьшает скорость охлаждения металла сварочной ванны и околошовной зоны, что обеспечивает полную графитизацию металла шва и отсутствие отбела в околошовной зоне, а также исключает возможность появления сварочных напряжений.

Подогрев чугунного изделия до 250—400 °С для уменьшения сварочных напряжений и скорости охлаждения с целью получения более пластичной структуры металлической основы чугуна часто называют *полугорячей сваркой*.

Способ холодной сварки требует меньших затрат. Кроме того, при нем имеется возможность варьировать в больших пределах химический состав металла шва. Но при наложении валика на холодную поверхность чугуна вследствие быстрого отвода теплоты в околошовной зоне образуются отбеленные участки, а металл шва также может получиться твердым и хрупким. Превращения в околошовной зоне при холодной сварке чугуна определяются химическим составом, исходной структурой свариваемого чугуна и распределением температур в поперечном сечении соединения.

Для рассмотрения структурных превращений в околошовной зоне воспользуемся тройной диаграммой состояния Fe—C—Si, связав ее с участками зоны термического влияния свариваемого чугуна посредством кривой распределения температуры. На рис. 151 изображена

плоская диаграмма состояния Fe—C—Si, с разрезом в точке, соответствующей 2,5 % кремния. Хотя приведенная схема справедлива только для одного определенного состава чугуна, она дает возможность на этом конкретном примере выяснить основные положения по связи температуры и скорости ее изменения со структурой отдельных участков околошовной зоны. Из схемы следует, что вся околошовная зона состоит из пяти основных участков, особенности которых и разберем.

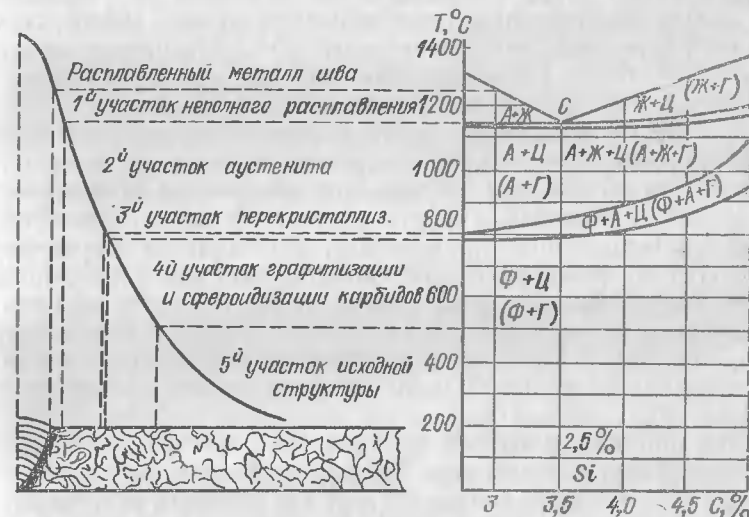


Рис. 151. Структурные превращения в зоне термического влияния в чугуне при сварке

Участок 1-й неполного расплавления ограничивается температурами в пределах 1150—1250 °С. В процессе сварки в нем наряду с жидкой фазой имеется твердая фаза, которая представляет собой аустенит с предельным содержанием углерода (1,7—2,0 %). При большой скорости охлаждения на этом участке может иметь место образование белого чугуна.

Участок 2-й аустенита в процессе нагрева и охлаждения находится в твердом состоянии и в рассматриваемом случае ограничен эвтектической (1150 °С) и эвтектоидной (800 °С) температурами. Структура участка определяется исходной структурой чугуна и температурой нагрева.

При охлаждении участка аустенита изменения в структуре будут происходить в соответствии с изменением температуры и скорости охлаждения. Для того, чтобы на данном участке не получить мартенсита, скорость его охлаждения должна быть небольшой. При заданном составе чугуна это может быть достигнуто изменением погонной энергии дуги или повышением начальной температуры свариваемого изделия подогревом. Структура по ширине участка в связи со значительным интервалом температур в 350 °С также будет меняться.

Участок 3-й перекристаллизации очень узкий, он имеет интервал температур всего 30 °С. Структура этого участка будет промежуточной по сравнению со структурами 2-го и 4-го участков.

Участок 4-й графитизации и сфероидизации карбидов характеризуется тем, что нагревается ниже критических температур. На нем наблюдается увеличение количества графита вследствие графитизации карбидов и некоторой их сфероидизации (округления). Этот процесс улучшает структуру и механические свойства металла, он зависит от исходной структуры чугуна и длительности его нагрева.

Участок 5-й исходной структуры нагревается до температуры не выше 400—500 °С; структурных изменений в нем нет.

Склонность к отбелу металла на участке неполного расплавления околошовной зоны тем больше, чем меньше в чугуне углерода и кремния. Чтобы избежать при сварке чугуна отбела в 1-м участке околошовной зоны, необходимо, чтобы содержание углерода в нем было не менее 3 %, кремния не менее 2 %, а графита не менее 2,5 %.

Металл шва оказывает существенное влияние на отбел 1-го участка зоны; наибольшая склонность к отбелу на этом участке возникает тогда, когда сварка чугуна (первого слоя) производится стальными электродами с обычным тонким покрытием, так как при этом вследствие конвективной диффузии углерода из жидкой фазы 1-го участка в металл шва его содержание в 1-м участке околошовной зоны заметно снижается. Уменьшение склонности к отбелу 1-го участка при сварке чугуна может быть достигнуто введением в металл шва таких графитизаторов, как медь, никель, т. е. соответствующим изменением химического состава металла шва.

Исключить или уменьшить возможность образования мартенсита во 2-м участке околошовной зоны можно снижением скорости охлаждения, что достигается увеличением погонной энергии или подогревом изделия.

Холодная сварка чугуна

Существует большое разнообразие способов холодной сварки чугуна:

1) сварка чугуна стальными электродами: а) без постановки шпилек; б) с постановкой шпилек; в) сварка стальными электродами с карбидообразующими элементами в покрытии;

2) сварка чугунными электродами;

3) сварка электродами из цветных металлов и комбинарованными;

4) сварка в среде углекислого газа, порошковой проволокой, электрошлаковая и др.

Выбор того или иного способа холодной сварки чугуна определяется рядом технологических и экономических факторов и требуемым качеством соединения.

Сварка электродами из малоуглеродистой стали без постановки шпилек. Данный метод может быть применен при заварке пороков на небольшой глубине и ширине на отливках ответственного назначения и не подлежащих механической обработке, а также при ремонте чугунных изделий.

Сварка первого слоя производится электродами малого диаметра, обычно 3 мм при малой погонной энергии и сварочном токе 60—70 А, вразброс, с перерывами, чтобы температура детали вблизи места сварки не превышала 50—60 °С. Слой получается тонким, пористым и с поперечными трещинами. Второй слой наносится на первый поперечными валиками, тем самым на поверхности детали в месте сварки создается слой стали. Дальнейшая сварка может производиться с большей погонной энергией, но также с перерывами, чтобы избежать концентрации теплоты в одном месте. Последующие слои создают достаточную плотность шва.

При сварке стыковых соединений для увеличения общей площади связи наплавленного и основного металла шов рекомендуется распространить на кромку детали по ширине, равной толщине детали (рис. 152, а), а для уменьшения напряжения — применить проковку средних слоев.

Этот метод сварки не следует применять для исправления чугунных изделий, работающих при температуре выше 100 °С, так как в месте сварки могут возникнуть дополнительные напряжения (вследствие разницы в значениях коэффициента теплового расширения чугуна и стали), а это может явиться причиной нарушения сплошности соединения.

Сварка электродами из низкоуглеродистой стали с установкой шпилек. Чтобы увеличить прочность соединения при ремонте ответственных крупногабаритных чугунных изделий — станин, рам, кронштейнов и т. п., применяют

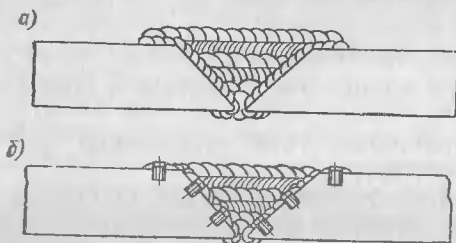


Рис. 152. Вид стыкового соединения чугуна: а — стальное покрытие без установки шпилек; б — стальное покрытие с установкой шпилек

стальные шпильки, которые ввертывают на резьбе в тело детали. Назначение шпилек — связать металл шва с чугуном и передать усилия от шва в массу основного металла, не подвергшегося термическому воздействию, минуя хрупкие участки околошовной зоны. Диаметр шпилек d принимается равным 0,15—0,25 толщины детали, но не менее 3 мм и не более 16 мм; расстояние между шпильками $(3 \div 4) d$, расстояние от шпилек до кромки $(1,5 \div 2,0) d$, глубина ввертывания шпилек $1,5d$, высота выступающей части $(0,8 \div 1,2) d$. При выполнении операций по подготовке отверстий для шпилек нельзя применять масло.

Детали толщиной до 12 мм могут свариваться без подготовки кромок с установкой одного ряда шпилек с каждой стороны. В деталях большой толщины выполняется односторонняя или двусторонняя подготовка кромок с углом раскрытия 90°, и шпильки устанавливаются также по скосам кромок в шахматном порядке.

Сварку производят при малой погонной энергии стальными электродами диаметром 3 мм с тонким покрытием или покрытием УОНИ-13/45. Сначала шпильки обваривают кольцевыми швами вразброс, с перерывами для охлаждения деталей. После обварки шпилек до сопри-

косновения кольцевых валиков между собой производится наплавка участков между обваренными шпильками также вразброс. Второй слой выполняется поперечными небольшими валиками вразброс. Для остальной части шва могут применяться электроды большого диаметра с соблюдением ранее указанных положений по сварке, с заполнением шва, как указано на рис. 152, б. При сварке деталей большой толщины для уменьшения количества наплавленного металла целесообразно производить сварку стальных связей различных форм и размеров.

Холодная сварка чугуна стальными электродами с установкой шпилек позволяет производить сварку в нижнем, вертикальном и потолочном положениях, соединения получаются прочными, но плотность не всегда обеспечивается.

Таблица 64. Химический состав чугунных стержней, применяемых при сварке

Марка чугунных стержней	Массовое содержание, %		
	C	Si	Mn
А	3,0—3,5	3,0—3,4	0,5—0,8
Б	3,0—3,5	3,6—4,0	0,5—0,8

Марка чугунных стержней	Массовое содержание, %			
	S, не более	P	Cr	Ni
			не более	
А	0,08	0,2—0,4	0,05	0,3
Б	0,08	0,3—0,5	0,05	0,3

Сварка чугуна чугунными электродами. При этом методе сварки электродом служит чугунный стержень марки А или Б по ГОСТ 2671—80 (табл. 64), на который наносятся различные толстые покрытия, например ОМЧ-1, которое содержит 25 % мела, 41 % графита, 9 % ферромарганца, 25 % кварцевого песка.

Качество сварного соединения при холодной сварке чугуна чугунными электродами неоднородно, так как трудно обеспечить такую скорость охлаждения металла шва и околошовной зоны, при которой не было бы отбела на всем протяжении шва. Поэтому в различных сечениях соединения получаются различные структуры и твер-

дость. Этот способ сварки широкого применения не имеет. Лучшие результаты получаются при подогреве детали до температуры 300—400 °С, т. е. при полугорячей сварке чугуна.

Сварка стальными электродами с карбидообразующими элементами в покрытии. Сущность этого способа заключается в том, что углерод, поступающий в шов из основного металла, связывается в труднорастворимые мелкодисперсные карбиды ванадием, содержащимся в электродном покрытии. Карбиды эти столь прочны, что углерод, находящийся в них, не участвует в фазовых превращениях. Если карбидообразующие элементы содержатся в шве в избытке по отношению к углероду, структура шва получается ферритной с включениями мелкодисперсных карбидов.

Сварка по этому способу выполняется в основном электродами ЦЧ-4, в покрытие которых вводится 70 % феррованадия, в результате чего наплавленный металл содержит 9—10 % ванадия. Сварку чугуна электродами ЦЧ-4 следует производить с малой погонной энергией по принципу наиболее холодного места. Поэтому производительность процесса сварки электродами также низкая.

Холодная сварка электродами из никелевых сплавов. При наличии в жидкой ванне элементов активных графитизаторов можно избежать отбела в околошовной зоне. Поэтому, когда поверхность должна быть механически обработана и неравнопрочность соединения с основным металлом допускается, сварка может производиться электродами из цветных металлов, содержащих никель, медь. Наибольшее применение получили электроды из монель-металла, который представляет собой сплав никеля (65—70 %) и меди (25—30 %), и электроды ЦЧ-3А, имеющие стержень из проволоки СВ-08Н50 и основное покрытие. На проволоку из монель-металла диаметром 2—4 мм наносится покрытие специального состава, например из 40 % графита, 60 % мела или мрамора и др.

Наплавка этими электродами производится валиками длиной 50—60 мм; при этом сразу же после наложения валика его необходимо проковать легкими ударами молотка. Это вызвано тем, что усадка монель-металла при переходе из жидкого в твердое состояние составляет около 2 %. Совместное действие усадки и напряжений от сварки может вызвать образование трещин. Для уменьшения расхода дорогостоящего монель-металла и обеспе-

чения обрабатываемости стыкового шва после сварки иногда на кромки, подлежащие сварке, наплавляется слой монель-металла, а остальная часть шва выполняется электродами из малоуглеродистой проволоки. В некоторых случаях нижняя часть шва наплавляется электродами из малоуглеродистой проволоки, а верхний слой, подлежащий механической обработке, покрывается монель-металлом.

Холодная сварка медными и комбинированными медно-стальными электродами. Медным электродом сваривают изделия, работающие при незначительных статических нагрузках, а также изделия, требующие плотных швов. В производстве широкое применение нашли различные варианты комбинированных медно-стальных электродов: медный стержень с оплеткой из мягкой стали, стальной стержень с медной оболочкой, пучок из медных и стальных электродов, медный стержень с толстым покрытием, содержащим железный порошок, например электроды марки ОЗЧ-1 и др.

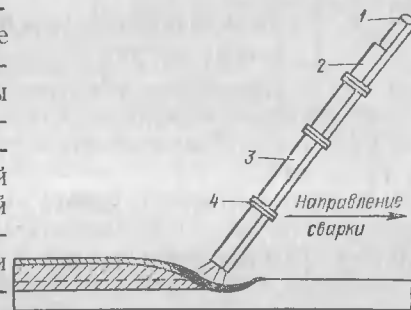


Рис. 153. Сварка пучком электродов: 1 — стальные стержни электрода; 2 — покрытие; 3 — стержень из монель-металла; 4 — связка

Появление комбинированного электрода и сплавление его с чугуном создают условия получения качественного шва, так как медь не соединяется с углеродом — она остается пластичной и вязкой, а сталь науглероживается, что повышает ее прочность.

Комбинированные электроды могут изготавливаться из любой марки меди. Наиболее простыми в изготовлении являются электроды, имеющие медный стержень с оплеткой из мягкой стали. Они изготавливаются следующим образом: на медный стержень длиной 300—350 мм навивается спираль из мягкой жести, нарезанной в виде полосок шириной 5—10 мм. Диаметр медного стержня берется равным 4—7 мм. Если между витками спирали будет небольшой интервал, то железа в электроде будет не более 8—12 %. На подготовленные стержни наносят покрытия: меловое, УОНИ-13/45 и др.

Широко и эффективно применяются электроды из меди с железным порошком в составе покрытия. Сварка такими электродами не вызывает затруднений. Для изготовления таких электродов в шихту покрытия УОНИ-13/55 добавляется 40—50 % железного порошка.

Сваркой пучком электродов отбел первого участка околошовной зоны полностью не устраняется. Лучшие результаты получаются, если в пучок добавляется стержень из монель-металла или латуни диаметром 2—3 мм.

Чтобы избежать затекания расплавленного металла впереди дуги, электрод при сварке располагается, как показано на рис. 153.

Механизированные способы сварки чугуна

Применяют следующие способы сварки чугуна:

- 1) тонкой проволокой в среде CO_2 ;
- 2) порошковой проволокой, без защиты и с защитой в среде CO_2 .

Газозлектрическая сварка чугуна тонкой стальной проволокой дает возможность: 1) получить небольшой провар; 2) выполнять сварку в любом пространственном положении.

Сварку чугуна в среде CO_2 тонкой проволокой марки Св-10ГС или Св-08Г2С следует вести при малой погонной энергии. Для проволоки диаметром 0,8—1,0 мм сила сварочного тока $I_{\text{св}} = 50 \div 75$ А, напряжение на дуге $U_{\text{д}} = 18 \div 21$ В, скорость перемещения дуги $v_{\text{п.д}} = 10 \div 12$ м/ч. Сварка производится короткими валиками (25—30 мм). Тут же по окончании наплавки валик перекрывается другим, так называемым отжигающим валиком в том же направлении. Металл, наплавленный таким образом, имеет ферритно-перлитную структуру, но заметных изменений структуры зоны термического влияния не наблюдается.

Сварка тонкой проволокой в среде CO_2 применяется для соединения труб из серого чугуна при сварке деталей из высокопрочного модифицированного чугуна и сварке чугуна со сталью.

Сварка чугуна порошковой проволокой наряду с механизацией процесса и повышением производительности позволяет в широких пределах регулировать состав наплавленного металла (изменение состава шихты и коэффициента заполнения проволоки).

В настоящее время разработаны и рекомендованы к промышленному применению три марки порошковой проволоки для сварки чугуна: ППЧ-1, ППЧ-2, ППЧ-3. Химический состав первых двух марок проволоки приведен в табл. 65.

Т а б л и ц а 65. Химический состав некоторых марок порошковой проволоки

Марка проволоки	Массовое содержание элементов, %				
	C	Si	Mn	Al	Ti
ППЧ-1	7,0—7,5	4,0—4,5	0,4—0,8	0,6—0,9	0,4—0,6
ППЧ-2	5,7—6,5	3,3—4,0	0,4—0,8	0,6—0,9	0,4—0,6

Как показали исследования, порошковую проволоку ППЧ-1 можно применять для холодной сварки чугуна на деталях, имеющих сквозные и несквозные дефекты размером до 100 см² на обрабатываемых и необрабатываемых плоскостях, расположенных в нежестком контуре (отбитые части, дефекты на выступающих частях отливок и др.). Для сварки рекомендуется постоянный ток прямой полярности при режиме, обеспечивающем в процессе сварки минимальную скорость охлаждения. Поэтому предпочтительно применение больших токов и малых скоростей перемещения дуги, а именно: для сварочной проволоки диаметром 2,8—3,0 мм $I_{\text{св}} = 280 \div 300$ А, $U_{\text{д}} = 28 \div 32$ В, $v_{\text{п.д}} = 4$ м/ч.

Механическая обработка наплавленной поверхности возможна потому, что благодаря большому вводу теплоты скорость охлаждения небольшая, и получается достаточно пластичная структура. Но в тех случаях, когда площадь, подлежащая заварке, большая и когда за счет соответствующего режима сварки нельзя заметно уменьшить скорость охлаждения металла наплавки и околошовной зоны, следует применить местный предварительный нагрев, хотя бы до 100—150°С. Если это нельзя осуществить, сварку следует производить с малой погонной энергией, валиками длиной 25—30 мм, по принципу наиболее холодного места или путем предварительного стального нагрева поверхности электродами основного типа, например УОНИ-13/45, для получения сплошной наплавки высотой 5—6 мм. После этого производится заварка детали

порошковой проволокой отдельными участками, примерно 80×80 мм с полным заполнением их по высоте, с оставлением между участками небольших промежутков, но по ширине достаточных для свободного манипулирования горелкой при их заварке. Эти промежутки завариваются в последнюю очередь. При таком методе заварки дефектного места большой площади меньше проявляются напряжения от укорочений при сварке.

Порошковая проволока ППЧ-2 имеет лучшие технологические свойства, чем проволока ППЧ-1. При сварке этой проволокой на повышенных режимах заметно улучшается растворимость шихты и жидкотекучесть сварочной ванны. Она имеет более широкую область применения и может быть использована как для создания лито-сварных чугунных конструкций, так и для ремонта чугунных деталей.

Порошковая проволока ППЧ-3 предназначена для горячей сварки чугуна, когда детали предварительно нагревают до температуры $550\text{--}650^\circ\text{C}$. При диаметре проволоки 3 мм сварку можно производить при следующем режиме: $I_{\text{св}} = 400\div 450$ А, $U_{\text{д}} = 36\div 40$ В.

Горячая сварка чугуна

Процесс горячей сварки чугуна складывается из ряда операций, выполняемых обычно в определенной последовательности.

Подготовка дефектного места к сварке заключается в тщательной очистке его от загрязнений, в разделке для образования полости, легко доступной воздействию сварочной дуги, в формовке для предотвращения вытекания металла из сварочной ванны. Формовка производится в опоках графитовыми или угольными пластинками, скрепленными формовочной массой из кварцевого песка, увлажненного жидким стеклом или другими формовочными материалами (рис. 154). Форму необходимо просушить при постепенном изменении температуры от 60 до 120°C , после чего производить дальнейший подогрев. В зависимости от размеров, формы деталей, объема сварки и месторасположения дефекта подогрев производится в специальных печах, горнах или колодцах до температуры $600\text{--}700^\circ\text{C}$. В крупных деталях простой формы может применяться местный подогрев. Сварка нагретых деталей производится чугунными электродами, состоя-

щими из стержня диаметром $6\text{--}12$ мм марки Б по ГОСТу 2671—80 и специального покрытия (например, ОМЧ-1, которое содержит 41 % графита, 9 % ферромарганца, 25 % мела, 25 % полевого шпата). Толщина покрытия $1,2\text{--}1,5$ мм.

Сварка ведется на постоянном или переменном токе при повышенных режимах $I_{\text{св}} = (50\div 60) d$, отдельными ваннами размером $50\text{--}60$ см². При большой площади дефекта производится выформовка отдельных участков, завариваемых при поддержании ванны в жидком состоянии. После затвердевания заваренного участка графитовая пластинка переставляется, и сваривается следующий участок — и так, без длительных перерывов до окончания сварки всего дефектного места. По окончании сварки деталь засыпается сухим песком или мелким древесным углем, покрывается асбестом и вместе с печью или горном медленно охлаждается.

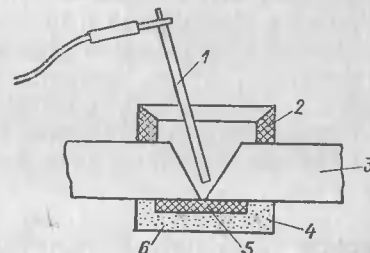


Рис. 154. Горячая сварка чугуна: 1 — электрод; 2, 5 — угольные пластинки; 3 — свариваемые детали; 4 — формовочная масса; 6 — опока

Сварку чугуна с нагревом до $250\text{--}400^\circ\text{C}$ (или, как ее называют, полугорячую) применяют, когда требуется исправить небольшой дефект сложной детали или дефект, расположенный на массивной детали в таком месте, где укорочение от нагрева при сварке не встречает большого сопротивления.

ГЛАВА XI. СВАРКА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Область применения и свойства

Применение цветных материалов и сплавов на их основе в народном хозяйстве непрерывно растет. Особенно широкое распространение они находят в современной энергетике, авиастроении, ракетной, атомной технике и химическом машиностроении в качестве кон-

струкционного материала. Наряду с давно применяемыми металлами, как медь, алюминий и их сплавы, все больше находят применение такие металлы (и сплавы на их основе) как титан, цирконий, гафний, ниобий, тантал, молибден и др.

Области применения отдельных цветных металлов и сплавов на их основе очень разнообразны. Медь и ее сплавы используют в промышленности для изготовления трубопроводов самого различного назначения, емкостей различных сосудов и холодильной техники и т. п.; алюминий и его сплавы — для выполнения различных емкостей в химической и пищевой промышленности. Сплавы алюминия применяют также при изготовлении ракет, самолетов, судов, вагонов и т. п. Это обусловлено их малой плотностью, сравнительно высокой прочностью, коррозионной стойкостью в ряде агрессивных сред и высокими механическими свойствами при низких температурах.

Сплавы титана находят все большее применение как конструкционные материалы в самолетостроении, химическом машиностроении, судостроении, ракетной технике и атомной энергетике. В этих отраслях промышленности используют тантал, ниобий, гафний, цирконий, а молибден — в высокотемпературных камерах горения, ракетной технике и т. д. Физико-механические свойства некоторых цветных металлов приведены в табл. 66.

Отдельные свойства цветных металлов и их сплавов заметно затрудняют процесс сварки плавлением.

1. Они обладают большим сродством к кислороду и некоторые из них, например алюминий, титан, используют в металлургии и сварочной практике в качестве раскислителей.

2. Из табл. 66 видно, что ряд металлов имеют оксиды более тугоплавкие, чем сам металл, что приводит к засорению металла шва этими оксидами, а в тех случаях, когда температура оксидов ниже температуры плавления металла, могут возникнуть легкоплавкие эвтектики, приводящие к кристаллизационным трещинам.

3. Такие металлы, как медь, алюминий, магний обладают высокой теплопроводностью, что способствует быстрому охлаждению места сварки и требует более мощных источников теплоты при сварке, а в ряде случаев предварительного, а часто и сопутствующего нагрева деталей.

4. При нагреве до определенных температур медь, алюминий, магний легко разрушаются от ударов, либо сварочная ванна проваливается под действием собственного веса, что часто вынуждает применять подкладки и различные формующие устройства при их сварке.

5. Все цветные металлы при нагреве растворяют газы окружающей среды атмосферы и появляющихся в плавильной зоне от сварочных материалов и химически взаимодействуют с ними.

Наибольшее сродство к газам проявляют тугоплавкие химически более активные металлы: титан, цирконий, ниобий, тантал, молибден. Насыщение металлов кислородом, азотом, водородом может резко ухудшить их свойства.

Особенности цветных металлов должны быть учтены при разборке технологического процесса их сварки. Медь, никель, алюминий, магний и сплавы на их основе успешно сваривают дуговой сваркой покрытыми электродами, угольным и металлическим электродом с применением флюса, в среде инертных газов, защитных газов с использованием неплавящегося (вольфрамового) и плавящегося электрода.

Пригодность методов сварки для группы тугоплавких химически активных метал-

Т а б л и ц а 66. Физико-механические свойства некоторых цветных металлов

Свойства	Cu	Al	Mg	Ti	Ni	Nb	Ta	Mo
Плотность, г/см ³	8,9	2,7	1,7	4,5	8,9	8,5	16,6	10,2
Температура плавления, °C	1083	660	650	1665	1455	2465	2990	2622
Температура кипения, °C	2595	2060	1107	3260	3000	4927	5425	5500
Коэффициент теплопроводности, Вт/(см·°C)	4,1	2,3	1,6	0,17	0,92	0,52	0,54	1,38
Предел прочности, МПа/мм ²	200	80	190	300	280	350	350	600
	240	110	2500	320	300	380	520	900
Температура плавления оксидов, °C	1235	2050		—	2090	—	—	1480

лов резко ограничена необходимостью тщательной защиты зоны сварки и мест нагреваемых титана и циркония до температуры выше 400—500 °С, а ниобия и тантала — до 200—300 °С от вредного действия окружающего воздуха. Поэтому в данном случае используется дуговая сварка в инертных газах с дополнительной защитой зоны сварки с помощью системы насадок, укрепленных на горелке. Защита обратной стороны шва осуществляется через неподвижную подкладку, укрепленную на свариваемом изделии, либо подвижную, перемещаемую вспомогательным рабочим.

§ 50. СВАРКА АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ

Алюминий — легкий металл с плотностью 2,7 г/см³ и температурой плавления 658 °С. Обладает хорошей теплопроводностью, электропроводностью и большим сродством к кислороду. Механические свойства алюминия и его сплавов во многом зависят от состояния поставки, например, предел прочности прокатанного и отожженного алюминия по сравнению с литым повышается с 80 до 170 МПа/мм², а при нагартовке увеличивается еще на 80 %, но относительное удлинение падает.

Алюминиевые сплавы, применяемые в технике, в зависимости от химического состава, способа получения и вида обработки подразделяют на деформируемые (т. е. используемые в прессованном, катаном, ковном видах) и литые (используемые в виде литья). Для алюминия и некоторых его сплавов принята маркировка буквой А. У литейных сплавов после А следует буква Л; у сплавов, предназначенных дляковки и штамповки — буква К. После этих букв следует цифра, обозначающая условный номер сплава. Деформируемые сплавы обозначаются следующим образом: алюминий-магний-свинец — АМг; алюминий-магний-марганец — АМц; сплав авиала — АВ.

Все дуралюмины обычно маркируются буквой Д и цифрой, показывающей условный номер сплава. В свою очередь, деформируемые сплавы можно разделить на две категории.

Первая категория — сплавы, термически неупрочняемые, к которым относятся двойные сплавы типа АМц (Ал—Мц) и АМг (Ал—Мг). Они характеризуются

умеренной прочностью, хорошей пластичностью, повышенным сопротивлением коррозии.

Вторая категория — термически упрочняемые сплавы, которые по своим свойствам подразделяются на три группы: первая группа — авиала типа АВ (Ал—Мг—Si) — обладают хорошей коррозионной стойкостью в естественно состаренном состоянии; вторая группа — дуралюмины типа Д (Ал—Cu—Mg), имеющие широкое распространение. Сплавы этой группы имеют различные свойства, в связи с чем их подразделяют на три подгруппы: 1) дуралюмины с хорошей пластичностью (Д18, ДЗП); 2) дуралюмины средней прочности (Д1); 3) дуралюмины повышенной прочности (Д16, Д17); третья группа — сплавы высокой прочности. Из этой группы практическое применение получил сплав В95, он составлен на основе Ал—Cu—Mg—Zn.

Химический состав и механические свойства некоторых типовых марок алюминия и его сплавов приведены в табл. 67.

Основными свойствами, затрудняющими сварку алюминия и его сплавов, являются приведенные ниже.

Легкая окисляемость алюминия приводит к образованию на его поверхности плотной тугоплавкой, с большой плотностью 3,6 г/см³, пленки оксида алюминия Al₂O₃. Оксидная пленка на поверхности металла, образующаяся при сварке на поверхности капли и ванны, препятствует сплавлению частиц металла и загрязняет шов.

Высокая температура плавления Al₂O₃ (2050 °С) и низкая температура плавления алюминия, не изменяющего своего цвета при нагревании, крайне затрудняет управление процессом сварки.

Высокий коэффициент линейного теплового расширения алюминия приводит к значительным остаточным деформациям.

Значительная растворимость водорода в расплавленном алюминии и резкое изменение растворимости при переходе алюминия из жидкого состояния в твердое в момент кристаллизации при большой скорости охлаждения, обусловленной еще большей теплопроводностью, приводит к образованию пор.

Большая жидкотекучесть и малая прочность при температурах выше 550 °С вызывает необходимость применения подкладок при сварке алюминия и его сплавов. Для удаления оксидной пленки перед сваркой алюминия

Таблица 67. Химический состав и механические свойства некоторых типовых марок алюминия и его сплавов

Схема легирования сплава	Марка сплава	Массовое содержание элементов, %			
		Al	Cu	Mg	Mn
Технический алюминий	АД00 А0	99,7 99,0	—	—	—
Алюминиево-марганцевый	АМ _ц	Основа	0,2	0,05	1—1,6
Алюминиево-магний	АМ _{г3} АМ _{г5} АМ _{г6}		0,1	3,2—3,8 4,8—5,8 5,8—6,8	0,3—0,6 0,5—0,8 0,5—0,8
Алюминиево-магнелиевый (дюраль)	Д1		3,8—4,8	0,4—0,8	0,4—0,8
Алюминиево-кремнистый	АКЧ		1,9—2,5	1,4—1,8	0,2
Алюминиево-магнелиевый	В95	1,4—2,0		1,8—2,8	0,2—0,6

Продолжение табл. 67

Схема легирования сплава	Марка сплава	Массовое содержание элементов, %							Механические свойства		
		Si	Zn	Fe	Ti	Другие элементы	Прочие примеси, не более	σ _B	σ _T	δ	%
Технический алюминий	АД00 А0	—	—	—	—	—	0,3 1,0	50 80	15 30	49 35	
Алюминиево-марганцевый	АМ _ц	0,6	0,1	0,7	0,2	—	0,1	130	50	23	
Алюминиево-магний	АМ _{г3} АМ _{г5} АМ _{г6}	0,5—0,7 0,5 0,4	0,2 0,2 0,2	0,5 0,5 0,4	0,1 0,02—0,10 0,02—0,10	Be 0,005	0,1	240 270 410	100 120 150	20 18 18	
Алюминиево-магнелиевый (дюраль)	Д1	0,7	0,3	0,7	0,1	Ni 0,1		410	250	15	
Алюминиево-кремнистый	АКЧ	0,5—1,2	0,3	0,7	0,1	Ni 0,8—1,3	0,1	390— 430	320— 360	10	
Алюминиево-магнелиевый	В95	0,5	5,0—7,0	0,5	—	Cr 0,1—0,25		520	440	14	

и его сплавов необходимо производить химическую или механическую очистку металла, а в процессе дуговой сварки алюминия и его сплавов незащищенной дугой следует применять флюсы на базе щелочных и щелочно-земельных металлов, способные растворить и вывести оксиды в шлак.

При сварке алюминия и его сплавов неплавящимся электродом в аргоне тонкая оксидная пленка удаляется за счет катодного распыления. Уменьшение остаточных деформаций при сварке достигается жестким закреплением деталей в специальных приспособлениях и применением сосредоточенных источников нагрева и др. Предупреждение пористости достигается применением средств, ограничивающих доступ водорода в плавильную зону, а иногда введением в плавильную зону элементов, связывающих водород в летучие соединения.

Подготовка под сварку. Перед обработкой материал из алюминия и его сплавов очищают от упаковочной бумаги и смазочного материала. Затем материал проходит правку, разметку и маркировку.

Заготовка деталей производится механическим путем на гильотинных ножницах, дисковых и ленточных пилах, фрезерных станках и т. д. или плазменной резкой с припусками для последующей подготовки свариваемых кромок. Перед сборкой свариваемые кромки должны быть обезжирены и зачищены. Для обезжиривания деталей используют растворитель—ацетон, этиловый спирт и др. Особое внимание при обезжиривании должно быть уделено чистоте свариваемых кромок и прилегающих к ним участков на ширине не менее 40 мм. Кроме того, кромки и прилегающие к ним участки шириной до 25 мм должны быть зачищены с помощью механических щеток из нагартанной коррозионно-стойкой проволоки диаметром 0,1—0,2 мм при длине ворса не менее 30 мм или шабером, после чего кромки вновь обезжиривают растворителем.

Если на поверхность детали необходимо установить какие-либо элементы и приварить к ней, то поверхность детали и элементов предварительно также должна быть обезжирена и зачищена вышеуказанными способами.

Электродная сварочная проволока, а также присадочные прутки должны также пройти соответствующую подготовку перед сваркой. Если проволока поступает в мотках, ее тщательно очищают от консервирующего смазочного материала обычно горячей водой или паром, после

чего производят химическую обработку поверхности проволоки по режимам в зависимости от применяемых химикатов, их концентрации и температуры водных растворов. Так, например, может быть применен следующий режим обработки: травление проволоки в щелочном 2—5 %-ном растворе в течение 5—20 мин при температуре 60—70 °С; промывка в проточной воде при температуре 50 °С; промывка в холодной проточной воде; осветление в 15 %-ном растворе азотной кислоты в течение 2—5 мин при температуре 60—70 °С; промывка в холодной проточной воде; промывка в проточной воде при температуре 60—70 °С.

Химически обработанная сварочная проволока должна храниться в контейнерах, а прутки — в пенах, предотвращающих их от загрязнений и влажной атмосферы.

Типы соединений и требования к сборке. Основные типы соединений, применяемые при сварке алюминия и его сплавов, регламентированы ГОСТом 14800—75. Некоторые приведены в табл. 68.

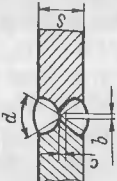
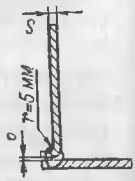
Сборку деталей и узлов из алюминия и его сплавов под сварку в большинстве случаев производят с помощью постановки прихваток, которыми фиксируется относительное расположение соединяемых деталей. При этом необходимо соблюдать следующие требования: прихватки выполняют ручной аргонодуговой сваркой с применением тех же присадочных материалов, что и для сварки; при сборке стыковых, тавровых соединений прихватки следует располагать со стороны, обратной наложению первого валика шва, при невозможности этого, прихватка выполняется со стороны первого валика с последующей тщательной зачисткой. В ряде случаев сборка производится с помощью прижимных приспособлений, гребенок (см. рис. 83), обеспечивающих относительное перемещение деталей в процессе сварки.

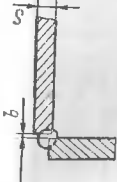
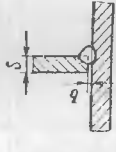
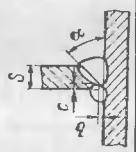
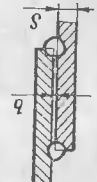
Гребенки рекомендуется располагать под углом 45° к оси соединения. В серийном и массовом производстве собирать сварные узлы рекомендуется в специальных кондукторах и приспособлениях без прихваток.

Сварочные материалы. Для ручной, полуавтоматической и автоматической сварки алюминия и его сплавов применяется сварочная проволока и присадочные прутки различных марок по ГОСТу 7871—75* табл. 69.

Проволока диаметром до 4 мм на заводе-изготовителе подвергается химической обработке и наматывается на

Т а б л и ц а 68. Некоторые типы соединений и конструктивные элементы подготовки кромок

Форма подготовки кромок и характер выполненного шва	Поперечное сечение кромок и сварного шва	Толщина	Зазор, не более	Притупление	Угол скоса, α , °
		S	b , мм		
Стыковое соединение					
С отбортовкой двух кромок, односторонний		1,0—2,0	0,5	—	—
Без скоса кромок, двусторонний		1,0—12,0	1,0	—	—
С двумя симметричными скосами двух кромок, двусторонний		12,0—60,0	2,0	2—13	70
Угловое соединение					
С отбортовкой одной кромки, односторонний		1,5—2,0	0,5	—	—

Без скоса кромок, односторонний		1,5—12,0	2,0	—	—
Со скосом одной кромки, двусторонний		5,0—20,0	2,0	2—6	60
<i>Тавровое соединение</i>					
Без скоса кромок, односторонний		1,5—20,0	2,0	—	—
Со скосом одной кромки, двусторонний		5,0—20,0	2,0	2—6	60
<i>Нахлесточное соединение</i>					
Без скоса кромок, двусторонний		1,5—20,0	2,0	—	—

Т а б л и ц а 69. Химический состав сварочных проволок для сварки алюминия и его сплавов по ГОСТ 7871—75*

Марка	Массовое содержание, %	
	Основные элементы	Основные примеси, не более
Св-А97	≥99,97	0,015 Fe; 0,015 Si; 0,005 Cu
Св-АМц	93,95—95,15 Al; 1,0—1,5 Mn; 0,3—0,5 Fe; 0,2—0,4 Si	0,1 Zn; 0,2 Cu
Св-АМг3	93,95—95,15 Al; 3,2—3,8 Mg 0,3—0,6 Mn 0,5—0,8 Si	0,5 Fe; 0,2 Zn 0,05 Cu
Св-АМг5	91,8—93,2 Al 4,8—5,8 Mg; 0,5—0,8 Mn	0,2 Ti; 0,4 Fe; 0,4 Si; 0,2 Zn; 0,05 Cu
Св-АМг6	91,0—92,4 Al 5,8—6,8 Mg 0,5—0,8 Mn	0,2 Ti; 0,4 Fe; 0,4 Si; 0,2 Zn; 0,4 Cu
Св-АМг61	91,0—93,35 Al 5,5—6,5 Mg; 0,8—1,1 Mn	0,12 Ti; 0,4 Fe; 0,4 Si; 0,2 Zn; 0,05 Cu
1557	92,8—94,4 Al 4,5—5,5 Mg 0,2—0,6 Mn	0,15 Ti; 0,35 Zn; 0,3 Fe; 0,15 Si; 0,05 Cu

катушки ровными рядами без перегибов, как правило, в нагартованном состоянии. Катушки упаковывают в полиэтиленовые мешки вместе с порошком силикогеля, являющимся индикатором нарушения герметичности. В случае нарушения герметичности мешка порошок становится розовым.

Для газозащитной сварки алюминия и его сплавов применяются защитные газы, аргон высшего и первого сорта, гелий высокой чистоты или смесь аргона и

гелия. При выборе защитного газа следует учитывать, что гелий — более легкий газ, чем аргон, поэтому расход гелия будет приблизительно в 1,5 раза больше, а аргон — в 6 раз дешевле гелия. Но гелий имеет более высокий потенциал ионизации, поэтому напряжение сварочной дуги почти в два раза больше, чем при сварке в аргоне и при одинаковой силе сварочного тока при сварке в гелии мощность сварочной дуги будет выше почти в два раза. Учитывая указанные особенности газов при сварке алюминия и его сплавов неплавящимся электродом и полуавтоматической сварке плавящимся электродом, в основном применяют аргон.

Для автоматической сварки материалов большой толщины часто применяют гелий или смесь аргона и гелия. Режимы аргонодуговой сварки алюминия и его сплавов неплавящимся электродом приведены в табл. 70.

Т а б л и ц а 70. Режим ручной аргонодуговой сварки алюминия и его сплавов неплавящимся электродом (нижнее положение шва)

Тип соединения	Форма подготовленных кромок	Толщина листа, мм	Сила сварочного тока, А	Диаметр, мм		Расход аргона, л/мин	Количество проходов
				вольфрамового электрода	присадочной проволоки		
Стыковое	Без скоса кромок	2	70—80	2	2,0—2,5	5—6	2
		3	100—140	3	2,5—3,0	7—8	
		4	160—190	4	3,0—4,0	7—8	
	С прямым скосом кромок	4	150—200	4	3,0—4,0	7—8	2—3
		6	240—280	5	3,0—4,0	8—9	
		8	300—340	6	4,0—5,0	9—10	
Тавровое	Без скоса кромок	4	170—220	4	3,0—4,0	7—8	2
		6	250—280	5	4,0	8—10	
		10	340—380	6—7	4,0—5,0	10—12	
	С прямым скосом кромок	5	180—230	4	3,0—4,0	8—10	2—5
		10	340—380	6—7	4,0—5,0	10—12	
		10	340—380	6—7	4,0—5,0	10—12	

Аргонодуговая сварка алюминия и его сплавов

Изготовление конструкций из алюминия и его сплавов более целесообразно производить способом газосварочной сварки неплавящимся вольфрамовым электродом и плавящимся электродом.

Аргонодуговая сварка неплавящимся электродом является лучшим способом сварки тонколистового алюминия. Она обеспечивает минимальную деформацию свариваемой конструкции и высокое качество сварного шва, не требуя специального флюса. Сварка производится на переменном токе с обязательным применением осциллятора и устройств, устраняющих составляющую постоянного тока. При питании дуги переменным током за счет катодного распыления в полупериоды, когда катодом является изделие, разрушается оксидная пленка.

Зажигание дуги непосредственным касанием вольфрамового электрода поверхности алюминиевых деталей затруднено. Поэтому дугу зажигают на вспомогательной графитовой пластинке, а затем переносят электрод на свариваемые кромки. В качестве инертного газа используется аргон первого и второго сорта по ГОСТ 10157—79.

Ручная сварка неплавящимся электродом может производиться во всех пространственных положениях как с присадочным материалом, так и без него, но без поперечных колебаний электродом. В качестве присадки применяют сварочную проволоку, близкую по химическому составу основному металлу. Длина дуги не должна превышать 1,5—2,5 мм, а расстояние от выступающего конца вольфрамового электрода до нижнего среза наконечника горелки при стыковых соединениях 1—1,5 мм, при тавровых (угловых) 4—8 мм. Рабочее давление аргона в зависимости от расхода устанавливается в пределах 0,01—0,05 МПа.

Режимы ручной аргонно-дуговой сварки алюминия и его сплавов в среде аргона неплавящимся электродом приведены в табл. 70.

Включение подачи аргона должно производиться за 3—5 с до возбуждения дуги, а выключение — спустя 5—7 с после обрыва дуги, что обеспечивается электромагнитным клапаном аппаратуры управления.

При полуавтоматической и автоматической сварке неплавящимся электродом, в отличие от ручной, горелка

обычно располагается вертикально, а присадка специальным механизмом подается в плавильную зону так, чтобы конец проволоки опирался на край сварочной ванны. Питание дуги, как и при ручной сварке, осуществляется переменным током.

Для ручной и механизированной сварки алюминия и его сплавов неплавящимся электродом промышленностью выпускаются специализированные полуавтоматы УДГ-301 и УДГ-501.

Ручная и автоматическая сварка трехфазной дугой вольфрамовыми электродами находит применение для сварки алюминия и его сплавов. Большая проплавляющая способность этого метода сварки позволяет при соответствующем режиме выполнять без раздела кромок за один проход (на подкладке из меди или нержавеющей стали) изделия толщиной до 30 мм. При этом резко уменьшается склонность металла шва к пористости, так как сварка производится без введения присадочного металла, за счет которого и имеет место увеличение пористости металла шва.

При сварке металла большой толщины, когда проплавляющая способность дуги должна быть максимальной, необходимо, чтобы сила тока в изделии была больше, чем в электродах. И наоборот, когда требуется минимальная проплавляющая способность дуги, например при наплавочных работах, сила тока в изделии может быть установлена меньше силы тока в электродах. Кроме того, регулировать глубину и ширину проплавления основного металла можно еще за счет расположения электродов относительно оси шва. Последовательное расположение электродов относительно оси шва вызывает увеличение глубины проплавления и уменьшения ширины шва, а поперечное расположение электродов относительно оси шва приводит к уменьшению глубины проплавления и увеличению ширины шва.

При выполнении трехфазной ручной или автоматической сварки вольфрамовыми электродами с присадочным металлом для уменьшения загрязнения металла шва рекомендуется применение присадочной проволоки допустимо большего диаметра: при ручной диаметром 3—6 мм, при автоматической диаметром 2—4 мм. Ориентировочные режимы однопроходной ручной и автоматической сварки стыковых соединений из алюминия приведены в табл. 71.

Таблица 71. Режимы сварки алюминия трехфазной дугой

Толщина металла, мм	Способ сварки	Диаметр, мм		Скорость сварки, м/ч	Сила сварочного тока, А	Примечание
		электродов	присадочной проволоки			
2 6	Ручная	1,5—2 3	2—3 3	10—12 8—12	60 150	Сварка на весу
10 14 20 30	Автоматическая	8 10 10 10	2 2 2,5 2,5	28—30 13—15 7—8 4—6	390—430 500—540 520—550 620—650	Сварка без разделки на подкладке

Источником питания трехфазной дуги чаще всего служат два стандартных однофазных трансформатора, соединенных открытым треугольником или трансформатор, специально изготовленный для трехфазной сварки.

Механизированная сварка алюминия и его сплавов в аргоне плавящимся электродом целесообразна для металла толщиной 4 мм и выше. При этом увеличивается производительность труда.

При сварке алюминия плавящимся электродом применяется постоянный ток обратной полярности, так как при прямой полярности дуга менее стабильна и не используется эффект катодного распыления; увеличивается разбрызгивание. Для питания дуги используются источники тока с жесткой внешней характеристикой. Возбуждение дуги производится замыканием под током сварочной проволоки на изделие.

Для механизированной сварки алюминия плавящимся электродом можно применить импульсно-дуговой полуавтомат типа ПДИ-303 в комплекте со сварочным выпрямителем ВДИ-301 и ранцевый полуавтомат типа ПРМ-4.

Рабочее давление аргона такое же, как и при сварке неплавящимся электродом. Расстояние между нижним срезом наконечника горелки и изделием рекомендуется устанавливать в пределах 5—15 мм.

Технология сварки алюминия и его сплавов имеет много общего, однако имеются и некоторые особенности,

присущие каждой группе сплавов. Так, деформируемые сплавы, неупрочняемые термической обработкой (АМц, АМг, АМг5, АМг6 и др.), упрочняются нагартовкой. Степень нагартовки для промышленных полуфабрикатов составляет до 40 % (так называемый полунагартованный сплав), что повышает предел прочности по сравнению с отожженным состоянием примерно на 20—25 % при одновременном снижении пластичности.

Сплавы типа АМц и АМг обладают хорошими сварочными свойствами, и, как ранее указывалось, все способы и режимы сварки чистого алюминия пригодны и для них. Однако при сварке полунагартованных сплавов прочность в зоне термического влияния снижается до показателей отожженного металла.

Кроме того, при сварке сплава АМц при малом содержании железа и кремния (менее 0,25 % каждого) возможно образование горячих трещин. В этом случае следует применять меры, предотвращающие их появление, как например, подогрев.

Ряд трудностей также возникает при сварке деформируемых сплавов, упрочняемых термической обработкой, типа дуралюмина, авиали.

Термическая обработка алюминиевых сплавов основана на изменении растворимости промежуточных соединений в алюминии.

Основным легирующим элементом в дуралюмине является медь. Она при комнатной температуре растворяется в количестве 0,5 %, а максимальная растворимость (при эвтектической температуре, равной 548 °С) составляет 5,7 %. Следовательно, при содержании меди в алюминии до 5,7 % сплав всегда можно перевести нагревом в однофазное состояние и зафиксировать его быстрым охлаждением. Но так как полученный твердый раствор содержит меди больше 0,5 %, и поэтому является пересыщенным, с течением времени из него начнет выделяться избыточное количество CuAl_2 в виде мелкодисперсных включений. Этот процесс называется старением или дисперсионным твердением, так как он сопровождается значительным повышением твердости и прочности. Так, сплав алюминия с 4 % меди в отожженном состоянии имеет временное сопротивление 200 МПа/мм², в свежезакаленном — 250 МПа/мм², а после старения — до 400 МПа/мм².

Установлено, что свойства дуралюмина после старения в значительной степени зависят от температуры закалки:

чем выше (в определенных пределах) температура закалки, тем больше прочность после старения. Однако нагрев выше определенной температуры вызывает перегрев — рост зерна, окисление и оплавление границ зерен, что приводит к катастрофическому падению прочности и пластичности.

Для сварки дуралюмина приемлемы все способы электродуговой сварки; однако из рассмотрения свойств дуралюминов явствует, что равнопрочность металла шва, зоны термического влияния и участков сплава, подвергшихся тепловому воздействию сварки, не может быть достигнута. Особенно снижаются свойства на участке зоны термического влияния, который при сварке подвергался нагреву выше температуры 520°C , т. е. где имел место перегрев, рост зерна, оплавление и окисление границ зерен. Кроме того, при сварке дуралюмина легко могут возникнуть трещины, что весьма затрудняет изготовление конструктивно жестких соединений. Практически можно считать, что при сварке дуралюмина прочность сварных соединений может быть получена не выше 50—60 % от прочности основного металла.

В состав дуралюмина кроме меди вводят небольшое количество магния и марганца с целью улучшения его свойств. Более того, дуралюмин не должен применяться в условиях возможного протекания коррозионных процессов из-за низкой коррозионной стойкости их сварных соединений.

Кроме дуралюмина, к этой же группе относятся сплав АВ (авиаль) с содержанием 0,45—0,90 % Mg и 0,5—1,2 % Si и сплавы типа АК, по составу близкие к дуралюминам, но применяемые в кованом и штампованном виде.

Часто возникает необходимость в сварке литейных алюминиевых сплавов. Типичным примером таких сплавов являются так называемые силумины — сплавы алюминия с 11—14 % Si (иногда применяются «бедные силумины», содержащие 5—6 % Si; они, как правило, легируются еще небольшими добавками меди, магния, марганца, как, например сплавы АЛ-5, АЛ-10).

Применительно к силуминам сварка используется главным образом как средство ремонта и исправления брака литья. В результате неравномерного нагрева и низкой пластичности возможно появление трещин. Поэтому перед сваркой необходим предварительный подогрев изделий до температуры около 250°C .

Для предотвращения разрушения при нагреве от собственного веса часто устанавливают железные подкладки, нагреваемые вместе деталью. Жесткие крепления при этом недопустимы, так как способствуют трещинообразованию. Остывание деталей после сварки должно быть медленным.

Состав присадочного металла должен соответствовать основному металлу.

Автоматическая сварка плавящимся электродом алюминия и его сплавов полукрытой дугой

Этот способ сварки разработан Институтом электросварки УАН. Сварка полукрытой дугой была разработана в связи с тем, что при сварке алюминия

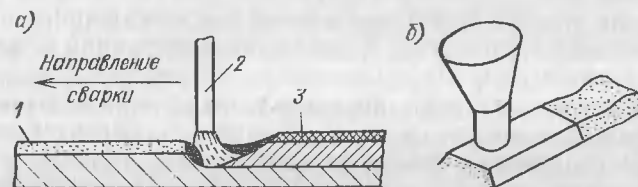


Рис. 155. Сварка алюминия по флюсу: а — материалы, участвующие в процессе;

1 — слой флюса; 2 — электрод; 3 — шлак; 4 — дозатор

под флюсом, состоящим из различных солей, возрастает концентрация водяных паров, и расплавленный металл насыщается водородом, становясь пористым. Кроме того, толстый слой токопроводящего флюса вызывает значительное шунтирование тока при сварке под флюсом, что приводит к неустойчивому горению дуги, плохой дегазации и формированию шва. Поэтому сварка производится полукрытой дугой при определенном дозированном слое флюса, регулируемом специальным дозатором, перемещающимся впереди сварочной дуги (рис. 155).

Сварка производится на постоянном токе обратной полярности при вылете электрода 50—60 мм с применением флюсов: АН-А1 — для сварки алюминия и сплава АМц, УФОК-А1 — для сварки чистого алюминия и его сплавов и др. Односторонняя сварка производится по зазору от 1,0 до 2,0 мм на флюсовой подушке или на подкладках.

Высокая мощность дуги позволяет производить сварку без подогрева; при этом не требуется разделка кромок, даже при толщине металла 20—25 мм.

Сварку производят электродами, размещенными под углом 10—20° от вертикали, без поперечных колебаний при длине дуги 15—25 мм на различных режимах в зависимости от толщины свариваемых деталей с подформовкой обратной стороны шва.

Остатки флюса и шлака сильно разъедают алюминий, поэтому их следует тщательно удалять с поверхности шва и прилегающего к нему основного металла механическим способом и промывкой водой.

Сварка угольным электродом дает плотные швы, практически равнопрочные основному металлу. Сварка алюминия металлическим электродом — простой и дешевый метод.

В настоящее время для сварки алюминия применяют электроды марки ОЗА-1, а для сплавов алюминия — электроды марок А2, ОЗА-2.

Подготовка деталей под сварку аналогична подготовке для сварки в защитных газах. Сварка производится электродами диаметром 4—8 мм на постоянном токе обратной полярности при $I_{св} = (45 \div 55) d_{эл}$ А и $U_d = 28 \div 34$ В при быстром ее перемещении без поперечных колебаний.

Алюминий толщиной до 4 мм сваривается без подогрева, а толщиной 8—10 мм — с подогревом 160—200 °С.

Одним из недостатков сварки металлическими электродами является внутренняя пористость швов. Однако при сварке чистого алюминия свойства сварного соединения близки к свойствам основного металла.

Ручная дуговая сварка угольным и металлическим электродом

Ручная сварка угольным электродом применяется при исправлении дефектов отливок, при случайных работах небольшого объема, а также по отбортовке тонколистового алюминия. Сварка алюминия и его сплавов угольным электродом возможна только в нижнем положении постоянным током прямой полярности. В качестве присадочного материала применяется электродная проволока по ГОСТ 7871—75 либо прутки из сплава АК, содержащего 5 % кремния. Для растворения оксидной пленки при сварке применяются флюсы.

Материалы, составляющие флюс, обладают различными свойствами и выполняют ряд функций.

Хлор в сварочной ванне значительно уменьшает пористость, так как, взаимодействуя с водородом по реакции



образует химическое соединение, которое в виде пузырьков удаляется в атмосферу.

Наличие KF, NaF, LiF способствует растворению Al_2O_3 ; кроме того, KF, диссоциируя под действием теплоты сварочной дуги, создает защитную газовую оболочку, препятствующую образованию оксида алюминия.

§ 51. СВАРКА СПЛАВОВ НА МАГНИЕВОЙ ОСНОВЕ

Магний является наиболее легким металлом, плотность его 1,75 г/см³, в чистом виде из-за малой коррозионной стойкости и прочности для изготовления конструкций непригоден, но введение в магний таких элементов как алюминий, цинк, марганец и др. заметно повышают его механические свойства без увеличения плотности.

Так, предел прочности сплавов марок МА1, МА8, легированных в основном марганцем (1,3—2,5 %), достигает 210—230 МПа/мм², предел текучести составляет 90—110 МПа/мм² при относительном удлинении 10 %, а сплавов марок МА2, МА21, М3, М5, более сложнoleгированных (Al — 7,9 %, Zn — 1,5 %, Mn — 0,8 %), предел прочности — 260—300 МПа/мм², предел текучести — 140—150 МПа/мм², а относительное удлинение — 5—8 %.

Сплавы магния МЛ4, МЛ5 и др. используют для получения отливок. Сваркой устраняют дефекты литья. Эти сплавы имеют повышенную склонность к образованию горячих трещин и пор.

Магниевые сплавы отличаются повышенной чувствительностью к коррозии во многих средах. Это объясняется тем, что образующаяся поверхностная оксидная пленка неплотная и не обладает защитными свойствами, как оксидная пленка на алюминии. Поэтому поверхность магниевых сплавов искусственно защищают пленкой из солей хромовой кислоты. В связи с этим перед сваркой возникает необходимость с кромок и прилегающей поверхности основного металла (на ширину до 30 мм) травлением или ме-

ханическим путем тщательно удалять защитную пленку оксидов и другие загрязнения. Но после сварки на поверхность сварного соединения вновь наносят защитную пленку.

Сплавы магния находят применение в авиастроении, ракетостроении, судостроении для изготовления различных емкостей под различные жидкости. Трудности сварки магниевых сплавов создают следующие их особенности:

1. Магний, обладающий высоким сродством к кислороду, способствует образованию при сварке тугоплавкой пленки оксида магния MgO с температурой плавления $2500^\circ C$, затрудняет процесс сварки. Для разрушения пленки применяют флюс. При сварке в инертных газах на переменном токе используется эффект катодного распада.

2. Возможность образования легкоплавких эвтектик MgC ($T_{пл} = 485^\circ C$), $MgAl$ ($T_{пл} = 436^\circ C$); $MgNi$ ($T_{пл} = 508^\circ C$) увеличивает вероятность образования кристаллизационных трещин. Повышение сопротивляемости к образованию кристаллизационных трещин достигается введением в состав модификаторов.

3. Склонность сплавов к росту зерна при нагреве, особенно содержащих марганец, не допускает перегрева металла при сварке, поэтому при многослойной сварке последующие слои следует выполнять после охлаждения предыдущих.

4. Большая способность магниевых сплавов в жидком состоянии поглощать активные газы, особенно водород, из влаги или оксидной пленки, приводит к образованию пор, поэтому необходимо принимать меры к исключению попадания в зону сварки влаги и оксидов.

5. Высокий коэффициент линейного расширения магниевых сплавов приводит к значительному короблению сварных конструкций, а иногда к образованию трещин.

Сварку магниевых сплавов можно выполнять лишь при условии надежной защиты сварочной ванны и ближайших участков основного металла от окружающей атмосферы.

Основной способ сварки магниевых сплавов — дуговая сварка вольфрамовым электродом в среде инертных защитных газов (аргон высшего и первого сорта, гелий повышенной чистоты). На переменном токе сварку выполняют вольфрамовым лантанированным или итрированным электродом. Присадочная проволока, которая должна

также тщательно очищаться, как и основной металл, подбирается по составу близкая к основному металлу. Сварка возможна для любых видов соединений, исключение составляют соединения с отбортовкой кромок, при которых образуются так называемые карманы с обратной стороны соединения, так как их не представляется возможным покрыть защитной пленкой. С этой точки зрения нахлесточные угловые и тавровые соединения менее технологичны.

При сборке необходима тщательная подгонка кромок. При ручной сварке в аргоне металл толщиной до 3 мм сваривают без скоса кромок. При толщине листов 3—6 мм требуется V-образная разделка, а при толщине более 6 мм — X-образная с притуплением 1,5—2 мм. Для ручной дуговой сварки металла толщиной до 3 мм применяют вольфрамовый электрод диаметром 2—3 мм; причем сила тока должна составлять $I_{св} = (30 \div 40) d_w$, расход аргона 7—9 л/мин.

Автоматическая сварка возможна для металла толщиной от 1 мм и выше вольфрамовым электродом диаметром 2—6 мм при $I_{св} = (40 \div 75) d_w$, расходе аргона 6—10 л/мин, диаметре присадочной проволоки 1,5—3,0 мм. Для уменьшения перегрева сварку следует вести на повышенной скорости.

Для предупреждения попадания в сварочную ванну оксидной пленки с обратной стороны кромок сварку следует вести с полным проплавлением кромок, на подкладках обычно из высоколегированных сталей, которые также служат и для защиты обратной стороны шва. Длину дуги поддерживают минимальной (1—1,5 мм), что обеспечивает энергичное разрушение оксидной пленки за счет катодного распыления и улучшает защиту зоны сварки инертным газом.

Прочность сварных соединений магниевых сплавов, выполненных в аргоне, достигает 85—90 % прочности основного металла.

§ 52. СВАРКА ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ

Свойства титана и его сплавов

Развитие ряда отраслей промышленности потребовало применения новых конструкционных материалов, среди которых титан занимает первое место.

Главное преимущество титана и его сплавов по сравнению с широко известными конструкционными материалами (такими как алюминиевые и магниевые сплавы, кислотостойкие и жаростойкие аустенитные стали и другие) состоит в том, что при малой плотности ($4,5 \text{ г/см}^3$) они обладают высокими механическими свойствами при нормальных и высоких температурах и большой коррозионной стойкостью во многих средах.

Физические свойства и высокая температура плавления титана (1660°C) требуют при сварке концентрированного источника теплоты, но более низкий коэффициент теплопроводности и более высокое электрическое сопротивление создают условия, при которых для сварки титана требуется меньше электрической энергии, чем для сварки стали и особенно алюминия. Титан практически немагнитен, поэтому при его сварке заметно уменьшается магнитное отдувание дуги.

Титан существует в двух аллотропических формах. При нормальной температуре он имеет гексагональную решетку (α -фаза). При температуре 882°C титан претерпевает аллотропическое превращение, а при более высоких температурах — имеет решетку объемноцентрированного куба (β -фаза); α -фаза характеризуется мелкозернистой структурой и нечувствительна к скорости охлаждения после нагрева, β -фаза — крупным зерном и высокой чувствительностью к скорости охлаждения. В зависимости от фазового состояния сплавы титана можно условно разделить на три группы: α , $\alpha + \beta$ - и β -сплавы; при этом различные составляющие сплавов по-разному влияют на его структурное состояние и механические свойства (табл. 72). α -сплавы не упрочняются термической обработкой, но при большой скорости охлаждения в них происходят превращения мартенситного типа с образованием α -фазы, имеющей игольчатый вид. При этом размеры решетки изменяются незначительно, и эффект закалки практически не наблюдается. Все α -сплавы хорошо свариваются с получением достаточно пластичных сварных швов.

Сплавы с ($\alpha + \beta$)-структурой упрочняются термической обработкой, после чего принимают более высокую прочность при удовлетворительной пластичности.

Характерно, что все сплавы, приведенные в таблице, содержат то или иное количество алюминия. Это объясняется тем, что алюминий улучшает коррозионную стой-

Таблица 72. Химический состав, структура и механические свойства некоторых титановых сплавов

Массовое содержание элементов														
Марка сплава	Ti	Al	Mo	Mn	V	Cr	Sn	Fe	Si	C	O ₂	H ₂	N ₂	
BT-1 BT-3 BT-4 BT-5-1 BT-6 BT-8 OT-4 BT-15	Основа	—	—	—	—	—	—	0,3	0,15	0,1	0,015	0,015	0,04	
		4-5,2	—	—	—	—	—	0,3	0,2	0,1	0,02	0,015	0,05	
		4-5	—	—	—	—	—	0,3	0,15	0,05	0,015	0,015	0,03	
		4-5,5	—	—	—	—	2-3	0,3	0,15	0,1	0,015	0,015	0,04	
		3-6,5	—	—	—	3,5-4,5	—	0,3	0,15	0,05	0,015	0,015	0,04	
		5,8-6,8	—	—	—	—	—	0,4	0,2	0,1	0,02	0,015	0,04	
2-3,5	2,8-3,8	—	—	—	—	—	0,4	0,15	0,1	0,015	0,015	0,04		
3,0	1-2	—	—	—	—	11	—	—	—	—	—	—		
8,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
Марка сплава	Структура	Механические свойства												НВ
		σ _T		σ _B		δ		ψ		KCU, Дж/см ²		HB		
	МПа/мм ²		%											
	α	380—600	450—700	20—25	45—50	—	130—250							
	α+β	850—1050	950—1150	10—16	25—40	30—60	260—340							
		700—800	850—1050	15—22	20—30	35	—							
BT-5-1	α	650—850	750—950	12—25	20—25	40—90	240							
BT-6 BT-8 OT-4	α+β	800—900	900—1200	10—15	30—45	40—80	320							
		950—1100	1050—1250	9—16	30—55	30—60	310							
		550—650	700—900	12—20	25—55	35—65	200—300							
BT-15	β	—	—	—	—	—	—							

кость и обрабатываемость сплавов титана, повышает их прочность без существенного снижения пластичности.

Хром, марганец и ванадий, являясь β -стабилизаторами, сообщают титановым сплавам способность к термической обработке, повышая их прочность при нормальных и повышенных температурах.

Влияние кислорода, азота, водорода и углерода на структуру и свойства титана

Главным отрицательным свойством титана является его способность активно взаимодействовать при повышенных температурах с газами.

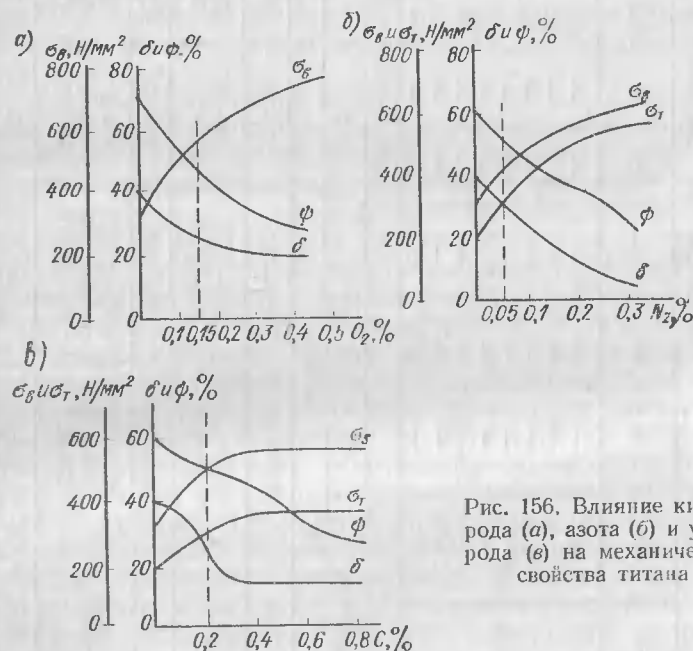
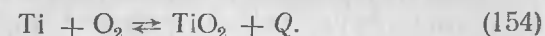


Рис. 156. Влияние кислорода (а), азота (б) и углерода (в) на механические свойства титана

Кислород. При комнатной температуре титан весьма устойчив против окисления, но при высоких температурах кислород легко растворяется как в α -титане, так и в β -титане, образуя твердые растворы, что приводит к повышению температуры $\alpha \rightleftharpoons \beta$ -превращения, резкому повышению прочности и снижению пластичности (рис. 156, а).

Титан в чистом кислороде сгорает с образованием оксида титана (IV) TiO_2 , а при нагреве титана на воздухе оксид титана (IV) образуется уже при температуре 450°C . Реакция образования оксида титана (IV) необратимая и протекает с выделением большого количества теплоты:



При длительном воздействии кислорода на титан, нагретый выше 450°C , на его поверхности образуется слой окалина, состоящий из оксида титана (IV); в ряде случаев под окалиной образуется твердый хрупкий слой титана, насыщенный кислородом, с твердостью, в два раза превышающей твердость самого титана.

В связи с тем, что кислород стабилизирует α -фазу, указанный слой называется *альфированным слоем*; он располагается в виде непревращенной α -фазы на поверхности металла. Альфированный слой на поверхности свариваемых деталей служит источником кислорода при сварке, а на поверхности сварных соединений — причиной образования трещин в шве. Поэтому содержание кислорода в титановых сплавах, предназначенных для сварки, строго ограничивается и должно быть не более 0,15 % (рис. 156, а).

Азот. По эффективности воздействия на титан азот является более энергичным элементом, чем кислород, и резко повышает прочностные свойства, понижая пластические (рис. 156, б). Вследствие высокого химического сродства к азоту титан является единственным элементом, который горит в азоте. При температуре выше 800°C происходит необратимая химическая реакция с образованием нитрида титана:



Температура плавления нитрида титана 2950°C . Азот в титане находится в виде твердого раствора и нитридов. Образованию твердого раствора способствует процесс диссоциации азота под действием теплоты сварочной дуги, при котором образуется атомарный азот, проявляющий более высокую активность к титану. Установлено, что даже небольшие примеси азота в титане способствуют образованию игольчатой α' -фазы; все сплавы титана с азотом способны подвергаться упрочняющей термической обработке; алюминий, марганец, молибден и особенно кислород понижают усвоение азота сварочной ванной.

Максимальное допустимое содержание азота в титановых сплавах 0,04—0,05 % (рис. 156, б).

Водород. Вредное влияние водорода в титане проявляется даже при небольшом его содержании. Он оказывает сильное охрупчивающее действие на титан, усиливая при этом охрупчивающее действие кислорода и азота.

Растворимость водорода в титане чрезвычайно велика и превосходит растворимость его в стали в десятки тысяч раз. Способность титана поглощать столь большое количество водорода объясняется тем, что наряду с образованием твердого раствора внедрения с титаном при содер-

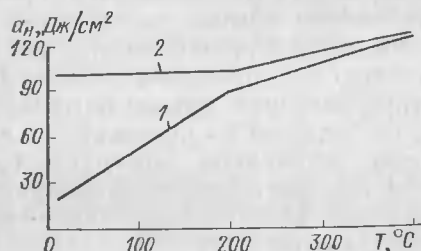


Рис. 157. Влияние температур на ударную вязкость титана с различным содержанием водорода:
1 — 0,0114 % H₂; 2 — 0,0046 % H₂

жании в титане более 0,18 % водорода образуется новая низкотемпературная γ -фаза (гидрид титана TiH₂).

При нагреве сплава склонность титана к образованию гидроксида падает, происходит растворение гидроксида титана, в связи с чем наблюдается восстановление ударной вязкости, особенно в сплавах с повышенным содержанием водорода (рис. 157). Гидриды титана располагаются внутри зерен и по их границам, имеют большой объем, что и вызывает появление трещин в местах их выделения.

Водород является также одним из основных источников образования пор при сварке титана и его сплавов. Поэтому для сварки следует применять сплавы, содержащие минимальное количество водорода, а электродную проволоку нужно подвергать вакуумному отжигу. Содержание водорода в титане допускается в тех количествах, при которых не происходит заметного ухудшения механических свойств металла. В связи с этим в титановых сплавах содержание водорода допускается не выше 0,010 %.

Углерод. Углерод является одной из таких примесей, повышение содержания которой вызывает понижение пластичности титана и его сплавов. Это имеет место потому, что растворимость углерода в титане невелика и при тем-

пературе 900 °C составляет 0,28 %, а в α -титане растворимость углерода в 5 раз меньше. Вследствие малой растворимости углерода содержание его в титане в количестве нескольких десятых процента приводит к выделению карбидов и заметному повышению прочности и понижению пластичности (см. рис. 156, в).

Возможные виды обработки титана и его сплавов

Изготовление деталей и конструкций из титана и его сплавов осуществляется посредством обычных методов обработки, широко применяемых при изготовлении изделий из сталей, алюминиевых и других сплавов.

Резка титана и его сплавов может производиться на гильотинных и пресс-ножницах, аргонодуговой или плазменной резкой. В случае применения кислородной резки окисленный слой на кромках необходимо удалить механическим путем.

Требования к технологии сборки и присадочному материалу

К сборке конструкций из титана и его сплавов следует относиться с особой ответственностью, так как точность сборки и чистота кромок определяет качество сварного соединения.

Для обеспечения хорошей защиты от окисления обратной стороны сварного соединения и уменьшения остаточных деформаций сборка изделий из титана производится на медных или стальных подкладках, через среднюю часть которых при сварке продувают инертный газ. Иногда сборку производят на подкладках из титана или на весу. При сборке на подкладках необходимо обеспечить плотное прилегание свариваемых кромок к подкладкам по всей длине.

Сборку рекомендуется вести с закреплением деталей в приспособлениях. В тех случаях, когда нет возможности закрепить детали в приспособление, применяют прихватки с обязательной защитой инертным газом участков сварного соединения, нагретых до температуры выше 500 °C.

Прихватку деталей из технического титана рекомендуется выполнять аргонодуговой сваркой без присадки, а детали из легированных титановых сплавов прихватывают только с применением присадки. Прихватки выпол-

няют длиной 30—50 мм, шагом 300 мм с обратной стороны шва во избежание перегрева. В начале и в конце стыка для выполнения начала и вывода конца шва технологические планки прихватываются. Качество прихватки должно контролироваться до и после зачистки.

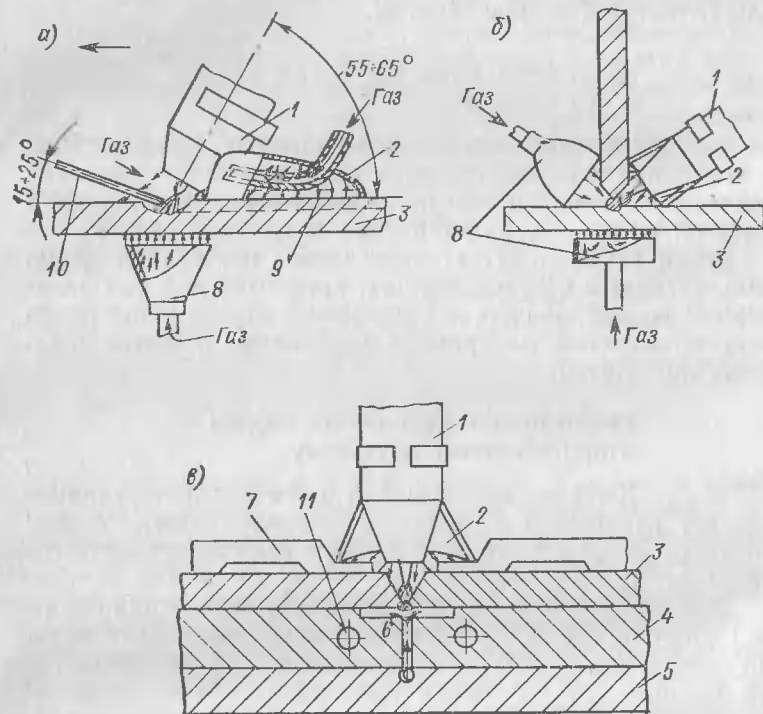


Рис. 158. Схема защиты стыковых и тавровых соединений титана и его сплавов при аргонодуговой сварке: а, б — с применением поддува; в — с применением охлаждающих подкладок:

1 — сварочная горелка; 2 — камера-насадка; 3 — свариваемое изделие; 4 — медная часть подкладки; 5 — стальная часть подкладки; 6 — канал для защитного газа; 7 — прижим; 8 — канал для подачи охлаждающей воды; 9 — сетка; 10 — поддув; 11 — присадочная проволока

При сварке с присадкой зазор не должен быть более 0,3—0,5 мм. Притупление кромок при сборке не должно быть больше 10 % толщины металла.

В зависимости от формы и размеров конструкции при сборке применяют различные приспособления. Например, плоские стыковые соединения можно собирать, как показано на рис. 158, в, а при сборке обечаек прихватки

выполняют на медной подкладке, поджимаемой к свариваемым кромок с помощью разжимных стальных колец и домкратов.

Для ручной сварки и прихватки проволоку рубят на стержни длиной 300—400 мм. Сварочная проволока, прутки и пластины должны иметь чистую, без альфированного слоя поверхность, не насыщенную водородом и не загрязненную маслом. Присадочный металл в случае его загрязнения, очищают путем пескоструйной обработки, травления или механической обработки.

Сварочную проволоку из титана и его сплавов изготовляют диаметром от 1,2 до 7,0 мм и поставляют в состоянии после вакуумного отжига при температуре 900—1000 °С в вакууме (133×10^{-3} Па) в течение 4 ч. Химический состав и механические свойства проволоки из сплавов ВТ-1 и ОТ-4 такие же, как и основного металла, но при более жестких требованиях по водороду (0,0025 %).

Особенности сварки титана и его сплавов

Высокая химическая активность и ранее указанные теплофизические свойства титана и его сплавов, а также склонность к росту зерна в околошовной зоне, определяют особенности их сварки. Из-за высокой химической активности титана нельзя применять для сварки его дуговую сварку с использованием покрытий и флюсов, содержащих оксиды и другие элементы, загрязняющие шов, и даже аргонодуговую сварку с односторонней защитой сварного соединения, если незащищенные участки сварного соединения и обратная сторона шва нагреты выше 500—600 °С.

Непременным условием получения качественного соединения при сварке плавлением титана является не только хорошая защита сварочной ванны, но и полная двусторонняя защита участков сварного соединения, нагретого до температуры выше 500 °С, от взаимодействия с воздухом защитными камерами или другими устройствами.

Защитные камеры для дуговой сварки титана и его сплавов в среде инертных газов делятся на три основные группы:

1) камеры-насадки для местной защиты сварного соединения (рис. 158, а);

2) камеры для общей защиты свариваемых деталей, которые, в свою очередь, могут быть подразделены на жесткие, мягкие и полумягкие. Оболочка мягкой камеры представляет собой прозрачную полиэтиленовую пленку и оборудуется специальным устройством для регулирования давления защитного газа и предохранительным клапаном. Оболочка полумягкой камеры состоит из двух частей: жесткого прозрачного основания из плексигласа и эластичного верха из полиэтиленовой пленки;

3) обитаемые камеры-мастерские с общей защитой свариваемых деталей и обеспечением в них условий для работы сварщика. Эти камеры располагаются в отдельном помещении, оборудованном источниками питания дуги током, установками для подачи в помещение аргона и его регенерации, приборами контроля чистоты атмосферы. Эти камеры должны обеспечивать безопасность сварщика, работающего в специальном герметичном костюме.

Выбор того или иного типа камер определяется размерами и формой свариваемой конструкции, а также окупаемостью затрат на их изготовление. Наиболее дешевыми являются камеры для местной защиты сварного соединения. Эффективность защиты при этом можно повысить путем применения стальных или медных накладок с лицевой стороны шва и медных подкладок для защиты обратной стороны шва с канавкой под шов, в которую через отверстие из канала подается инертный газ. Применение гелия для этой цели более эффективно, чем аргона, так как гелий легче воздуха.

Медные накладки и подкладки часто имеют водяное охлаждение, за счет чего можно регулировать скорость охлаждения и, как следствие, свойства и структуру металла шва и околошовной зоны. Чтобы избежать турбулентного потока инертного газа при сварке, насадки изготавливаются с сеткой.

О качестве газовой защиты при сварке титана можно судить приблизительно по цвету металла шва и околошовной зоны. Блестящая серебристая поверхность шва свидетельствует о хорошей защите от кислорода и удовлетворительных свойствах шва. Синий цвет шва и серые налеты на нем указывают на плохую защиту. Такой визуальный метод оценки эффективности газовой защиты не является характеристикой загрязнения шва газами, так как загрязнение металла шва азотом и водородом в определенных количествах не изменяет цвета металла (в связи с образо-

ванием раствора внедрения). Поэтому оценка насыщения поверхностных слоев металла газами производится по данным химического анализа или измерением твердости.

На рис. 158 показана схема защиты лицевой и обратной стороны шва при сварке стыковых и тавровых соединений, а на рис. 159 — трубных элементов.

При выборе того или иного вида защитных приспособлений необходимо учитывать не только технологические, но и экономические факторы. Так, для сварки труб диа-

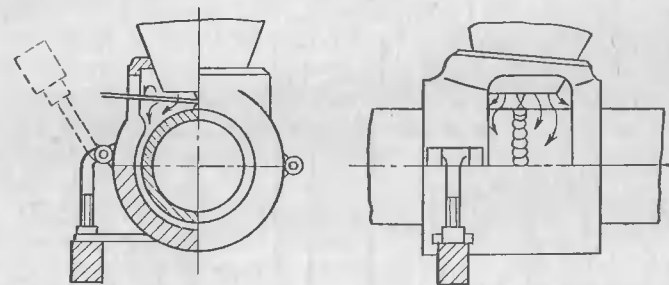


Рис. 159. Газозащитная камера для аргодуговой сварки труб

метром до 200 мм при массовом и серийном производстве для защиты лицевой стороны шва применяют газозащитные камеры (рис. 159). При этом камера плотно прилегает к поверхности стыка трубы по всему диаметру. Газ поступает из наконечника горелки для защиты расплавленного металла, заполняет камеру и удерживается в ней, обеспечивая хорошую защиту металла шва и околошовной зоны. Дополнительной подачи газа в камеру не требуется. Для сварки труб большого диаметра, в особенности при индивидуальном производстве, применение специальной изогнутой насадки (по типу, указанному на рис. 158, а) экономически выгоднее, чем изготовление газозащитной камеры.

Защита обратной стороны шва трубных соединений при массовом и серийном производстве осуществляется специальными приспособлениями, конструкция которых подбирается в зависимости от типа соединения. Но общим для них является создание в месте сварки небольшого объема газа за счет пенополиуретановых шайб (рис. 160) или других устройств. Газ скапливается в небольшом объеме в месте сварки, надежно защищая обратную сторону шва от атмосферного воздуха. В этом случае не требуется

заполнения газом всей полости трубы, что при серийном и массовом производстве дает возможность получить большую экономию газа. При индивидуальном производстве изготовление таких приспособлений экономически невыгодно, поэтому пользуются заглушками, устанавливаемыми с обеих сторон трубы. Газ, входя в одну из заглушек, вытесняет атмосферный воздух через другую, что обеспечивает защиту обратной стороны шва.

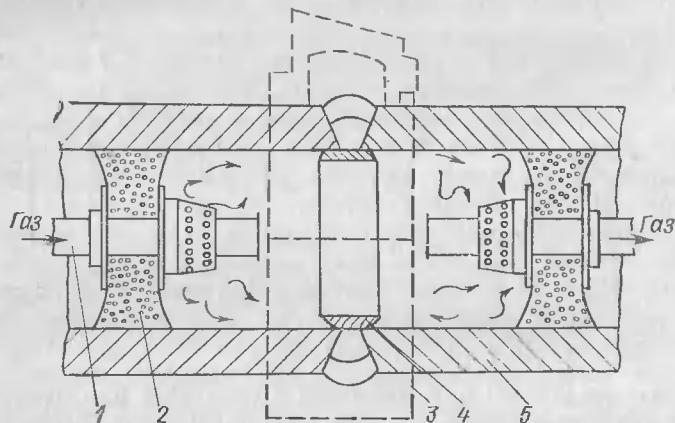


Рис. 160. Схема защиты лицевой и обратной стороны шва при сварке трубных соединений:

1 — трубка для подачи газа; 2 — пенополиуретановая шайба; 3 — газозащитная камера для защиты лицевой части шва; 4 — подкладное кольцо; 5 — свариваемые детали

В промышленности находят применение следующие способы сварки титана и его сплавов:

- 1) ручная и механизированная дуговая сварка неплавящимся электродом постоянно горячей и импульсной дугой без присадочного металла и с присадочным металлом;
- 2) сварка под флюсом;
- 3) сварка плавящимся электродом постоянно горячей и импульсной дугой;
- 4) электрошлаковая сварка;
- 5) плазменная сварка.

Ручная сварка титана неплавящимся электродом. Она применяется преимущественно при сварке коротких криволинейных швов.

Детали толщиной 0,5—1,5 мм, соединенные встык без зазора, свариваются без присадочного металла, а детали

толщиной 1,5—3,0 мм свариваются без присадочного металла, а в ряде случаев с применением присадочного металла. При стыковой сварке деталей толщиной более 3 мм следует производить разделку кромок и сварку вести с применением присадочной проволоки.

Дуговую сварку титана в среде инертных газов производят на постоянном токе прямой полярности. Подача газа должна опережать зажигание дуги. Сварка может производиться поверхностной или погруженной дугой, которую рекомендуют применять для сварки деталей толщиной более 3 мм. При этом вольфрамовый электрод, заточенный на конус, погружается в кратер и перемещается по линии наложения шва. При указанных условиях достигается лучшая защита, высокая концентрация теплоты в месте сварки и повышается производительность процесса.

При сварке поверхностной дугой длина дуги должна быть в пределах 0,5—2 мм.

Ручная аргонодуговая сварка титана и его сплавов при толщине более 3 мм выполняется с присадочным материалом в несколько проходов. Сварку ведут с малой погонной энергией, без колебаний электрода и присадки, с последующим охлаждением до 100 °С и тщательной зачисткой каждого прохода. Если на металле в процессе сварки появляются цвета побежалости, то разрешается его механическая очистка щеткой из коррозионно-стойкой стали; если же он был окислен до серого или темно-серого цвета, то окисленный слой следует вырубить до мягкого металла.

Рассмотрим технологию выполнения многопроходной сварки стыкового соединения из титанового сплава толщиной более 8 мм. Горелка размещается под углом 55—65°, а присадка — под углом 15—25° от горизонтали (см. рис. 158, а). Первый проход осуществляется с применением проволоки диаметром 1,2—2,0 мм. После остывания первого прохода при сварке технического титана производится сварка второго прохода с другой стороны шва без присадочной проволоки с предварительной вырубкой дефектов корня шва; при сварке обратной стороны шва легированных титановых сплавов трещины не образуются в связи с разбавлением металла шва основным. Сварку следует производить с присадочной проволокой из сплава типа ВТ-1. Последние проходы выполняются с применением присадки диаметром 3—5 мм поочередно с разных сторон шва.

Находит применение сварка титана неплавящимся электродом с применением флюсов-паст (АН-ТА, АН-Т17А и др.), что позволяет заметно снизить погонную энергию, получить узкие швы с более глубоким проваром, а также частично рафинировать и модифицировать металл шва.

Все большее применение находит в промышленности автоматическая сварка титана неплавящимся электродом, погруженной дугой деталей толщиной более 16 мм, при которой применяют электрод повышенного диаметра и повышенную силу сварочного тока. Соединения собирают встык без разделки кромок без зазора (рис. 161), а объем

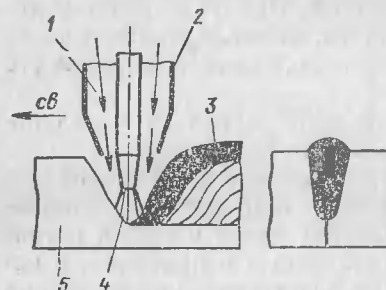


Рис. 161. Сварка в защитных газах вольфрамовым электродом погруженной дугой

подаваемого газа 1 через мундштук 2 должен быть в пределах 40—50 л/мин. Это приводит к сжатию столба дуги 4 и, как при плазменной сварке, ее температура, проникающая способность и давление возрастают, она погружается в ванну на основном металле 5, вытесняя расплавленный металл 3 в сторону, противоположную направлению сварки.

Таким образом, дуга горит в образовавшейся в металле полости. Это позволяет опустить электрод так, чтобы дуга, погруженная в металл, горела ниже поверхности металла. Образующаяся ванна расплавленного металла при кристаллизации образует шов. Этим способом можно сваривать не только титан, но и алюминий, высоколегированные стали и другие металлы при двусторонней сварке до 36 мм (чем меньше плотность свариваемого металла, тем большую толщину можно сварить). Шов, выполненный этим методом, имеет специфическую бочкообразную форму, определенную тем, что дуга горит ниже верхней плоскости металла.

При сварке погруженной дугой применяют входные и выходные планки для вывода дефектных начального (неполный провар) и конечного (усадочная раковина) участков шва.

Дуговая сварка титана в инертном газе плавящимся электродом. Дуговая сварка титана и его сплавов плавя-

щимся электродом позволяет сваривать детали большой толщины. При этом для сварки в качестве защитного газа, как правило, используют смесь гелия с аргоном или чистый гелий, что приводит к повышению напряжения и тепловой мощности дуги, в результате чего увеличивается объем расплавленного электродного металла, проплавление основного металла и производительность процесса. Изменение соотношений этих газов в смеси позволяет также регулировать форму провара, в частности ширину проплавления, которая возрастает пропорционально изменению эффективного потенциала ионизации. Так, если при прочих равных условиях ширина провара при наплавке валика в среде аргона была 7—8 мм, то при наплавке в среде гелия ширина провара будет уже 12 мм. При сварке титана плавящимся электродом чаще всего используют смесь, содержащую 80 % гелия и 20 % аргона. Сварку титана и его сплавов рекомендуется вести сварочной проволокой диаметром 1,2—2,0 мм на постоянном токе прямой полярности.

Защита лицевой и обратной стороны шва осуществляется так же, как и при дуговой сварке титана неплавящимся электродом в инертных газах. Стыковые соединения из листов толщиной 3—6 мм можно сваривать с зазором между кромками или по V-образной подготовке кромок под углом 60°. Для соединения больших толщин выполняют V- или X-образную подготовку кромок.

Автоматическая сварка титана под флюсом. Институт электросварки им. Е. О. Патона разработал способ автоматической сварки титана под флюсом. К флюсу, применяемому при сварке титана, кроме обычных технологических требований предъявляется еще ряд специальных: он должен обеспечить хорошую защиту плавильной зоны и участков остывающего металла от взаимодействия с воздухом, не оказывать окислительного действия на металл и быть сравнительно тугоплавким (ввиду высокой температуры плавления титана). Этим требованиям удовлетворяют бескислородные флюсы, разработанные Институтом электросварки им. Е. О. Патона: АН-Т1 для сварки металла толщиной до 6 мм и АН-Т3 для сварки металла больших толщин. Флюс АН-Т1 сухой грануляции обладает высокими технологическими свойствами и при высоте насыпаемого слоя, исключающего прорыв дуги через него, обеспечивает вполне удовлетворительную защиту металла шва от окружающей атмосферы.

Удалить шлаковую корку следует только после того, как шов остынет до температуры 400 °С. Некоторые данные по флюсу АН-Т1 приведены ниже:

Массовое содержание исходных материалов, %

Фтористый кальций CaF_2	79,5
Хлористый барий $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	19,0
Фтористый натрий NaF	1,5

Массовое содержание готового флюса, %

Фтор F	37—40
Хлор Cl	5,5—8
Кальций Ca	39—41
Барий Ba	12—14
Натрий Na	0,8—1

Непосредственно перед сваркой флюс необходимо высушить при температуре 200—250 °С в течение 1 ч (влага может явиться причиной появления пор и трещин).

На устойчивость процесса сварки и качество формирования шва существенное влияние оказывает вылет электрода l , значение которого принимается в зависимости от диаметра электродной проволоки: при диаметре электродной проволоки $d_{\text{эл}} = 1,2 \div 3$ мм $l = 12 \div 16$ мм, а при $d_{\text{эл}} = 3,0 \div 5,0$ мм $l = 16 \div 22$ мм.

Структура металла, сваренного под флюсом, получается более мелкозернистой, чем металла, сваренного в среде инертных газов: она имеет мелкоиглочатое строение α' -фазы. Это объясняется модифицирующим действием флюса.

Режимы автоматической сварки стыковых соединений под флюсом приведены ниже:

Диаметр электрода, мм	2	3
Сила сварочного тока, А	160—180	310—340
Напряжение, В	30—34	30—32
Скорость сварки, м/ч	40—60	50
Род тока	Постоянный обратной полярности	

Электрошлаковая сварка. Она применяется для соединения деталей из титана больших толщин, когда даже многопроводная сварка под флюсом является трудоемкой. При толщине свыше 30 мм автоматическая сварка под флюсом оказывается менее эффективной, чем электрошлаковая сварка, которая обеспечивает высокую производительность при удовлетворительном качестве.

Электрошлаковая сварка в обычном виде для сварки титана непригодна из-за насыщения металла шва газами

вследствие контакта расплавленного шлака с воздухом и длительного воздействия этого шлака на металл сварочной ванны. Насыщению металла шва газами также способствует взаимодействие с атмосферой нагретой части сухого вылета электрода и кромок основного металла, а также подсос воздуха в шланг при подаче электродной проволоки. Выход из этого затруднения был найден путем поддува аргона марки А в плавильную зону и проведением электрошлаковой сварки под флюсом АН-Т2, выплавляемым из чистого фтористого кальция. Этот флюс имеет температуру плавления около 1400 °С, а температура кипения шлака около 2000 °С на несколько сот градусов выше температуры плавления титана.

Электрошлаковая сварка титана выполняется переменным током от трансформаторов с жесткой внешней характеристикой, с применением как круглой электродной проволоки, так и пластинчатых электродов, равных по ширине толщине свариваемых деталей. Для уменьшения перегрева и интенсивного роста зерна сварку следует производить при возможно меньшем зазоре (22—26 мм) и минимальной погонной энергии.

Технология сварки таких активных металлов, как цирконий, тантал, ниобий, молибден, во многом подобна технологии сварки титана. Производится обычно в защитных камерах, заполненных инертными газами (аргон, гелий).

§ 53. СВАРКА МЕДИ И ЕЕ СПЛАВОВ

Медь имеет плотность 8,9 г/см³, температуру плавления 1083 °С, временное сопротивление в отожженном состоянии около 200 МПа/мм², а относительное удлинение 50 %; она обладает высокой тепло- и электропроводностью, химической стойкостью и сохраняет свои механические свойства в условиях высокого холода, когда почти все стали становятся хрупкими. Все это обусловило широкое применение меди в качестве конструкционного материала для изготовления различного рода сосудов, трубопроводов, химической аппаратуры, электрораспределительных устройств и других изделий.

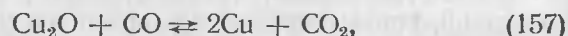
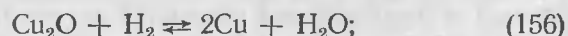
При изготовлении сварных конструкций из меди необходимо учитывать ряд особенностей, затрудняющих этот процесс:

1. Высокая теплопроводность меди (почти в 6 раз больше, чем у стали). Она вызывает необходимость при-

менения концентрированных источников нагрева и во многих случаях предварительного и сопутствующего подогрева основного металла при сварке.

2. Легкая окисляемость меди в расплавленном состоянии. При этом образуется оксид меди (I) Cu_2O , который растворяется в жидкой меди и образует в ней эвтектический сплав с более низкой температурой плавления, чем у чистой меди, так как в твердом состоянии медь почти не растворяет оксида меди (I), легкоплавкая эвтектика при кристаллизации выделяется в виде самостоятельной фазы, которая, располагаясь по границам зерен, снижает стойкость металла шва против кристаллизационных трещин.

3. Большая растворимость водорода в расплавленной меди. Падение растворимости при кристаллизации является причиной образования пор, что еще усугубляется большой скоростью охлаждения меди в связи с высоким коэффициентом теплопроводности. Кроме того, часть растворенного в расплавленном металле водорода, а при наличии и оксида углерода (I), взаимодействует с оксидом меди (I):



образуя водяной пар и углекислый газ, которые при охлаждении металла не успевают выделиться из металла и образуют поры.

При затвердевании меди пары воды «раздуваются», образуя в ней трещины. Такое явление носит название «водородной болезни».

В связи с указанным, в меди, предназначенной для изготовления сварных конструкций, содержание водорода не должно превышать 0,03 %, а для ответственных конструкций — 0,01 %; должно также строго ограничиваться содержание очень вредных примесей висмута и свинца.

4. Высокий коэффициент линейного расширения меди (в 1,5 раза больше, чем у стали). Это вызывает необходимость принятия дополнительных мер по предотвращению значительных остаточных деформаций конструкций.

5. Большая жидкотекучесть расплавленного металла. Жидкотекучесть меди заставляет выполнять сварку меди преимущественно в нижнем положении, исключая возможность выполнения односторонней сварки на весу

с полным проваром и хорошим формированием обратной стороны шва. Сварка выполняется на специальных подкладках: медных, графитовых, из сухого асбеста или на флюсовых подушках.

Ручная дуговая сварка меди угольным или графитовым электродом

Медь толщиной до 4 мм сваривается без скоса кромок, а при большей толщине необходима разделка с углом раскрытия $70-90^\circ$. Угольные или графитовые стержни имеют диаметр 4—20 мм, в качестве присадочного металла используют прутки из проволоки диаметром 3—5 мм из меди М0 или М1 и бронзы Бр КМц-3-1. Для улучшения условий протекания процесса сварки и качества шва применяют защитные флюсы, как например «борный шлак» — 95 %-ной прокаленной буры ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) и 5 %-ного металлического магния. Флюс в виде пудры наносят на поверхность прутков или свариваемых кромок, смоченных раствором жидкого стекла, после чего производят сушку на воздухе. Перед началом сварки необходимым подогрев начальных участков до температуры $250-300^\circ\text{C}$. Сварку ведут на постоянном токе прямой полярности в нижнем положении длинной дугой ($U_d \geq 40$ В), что необходимо для предотвращения науглероживания металла при образовании СО и пористости. Сила сварочного тока $I_{\text{св}} = (45 \div 55) d$, напряжение $U_d = 40 \div 50$ В, скорость сварки должна быть не ниже 15 м/ч.

После сварки рекомендуется проковка шва при температуре $550-800^\circ\text{C}$ и быстрое охлаждение в воде, что предотвращает сегрегацию Cu_2O по границам зерен.

Ручная дуговая сварка меди металлическим электродом

Подготовка изделий под сварку производится так же, как и для сварки угольным электродом. Наиболее широкое применение для сварки меди находят электроды марки ЗТ, «Комсомолец-100» и ММЗ-2.

Электродные стержни диаметром 3—6 мм подбирают идентичными основному металлу, но в некоторых случаях электроды марки ЗТ и Комсомолец-100 выполняются со стержнем из бронзы БрКМц3-1. При сварке электро-

дами 3Т, «Комсомолец-100» и ММЗ-2 питание дуги осуществляется постоянным током обратной полярности. Наличие в покрытии электрода ММЗ-2 поташа позволяет применять их и для сварки на переменном токе, но при этом увеличивается разбрызгивание металла. Ток подбирается из расчета 50 А на 1 мм диаметра электрода. Сварка выполняется короткой дугой без колебания конца электрода. После сварки рекомендуется производить проковку и быстрое охлаждение в воде. Металл шва, выполненного электродами «Комсомолец-100», обладает $\sigma_b = 200 \div 240$ МПа/мм², $\delta = 18 \div 20$ %, $a_n = 60 \div 80$ Дж/см², угол загиба сварного соединения 120—180°.

Дуговая сварка под флюсом

Дуговую сварку меди под флюсом можно осуществлять под слоем плавленного флюса неплавящимся угольным или графитовым электродом, плавящимся электродом и плавящимся электродом под керамическим флюсом. При сварке под флюсом угольным электродом, заточенным в виде плоской лопатки, детали собираются на графитовой подкладке и поверх стыка размещают полосу латуни, которая служит присадочным материалом и раскислителем металла шва. Засыпают прокаленный флюс ОСЦ-45 и сварку ведут на постоянном токе обратной полярности. Предварительный подогрев осуществляется закорачиванием электрода на изделие перед началом сварки.

Сварка меди под флюсом плавящимся электродом незначительно изменяет состав и физические свойства металла. Для сварки могут быть использованы плавленные флюсы АН-20, ОСЦ-45, АН-348А или керамический флюс ЖМ-1, содержащий 28 % мрамора, 57,5 % полевого шпата, 8 % плавикового шпата, 2,2 % древесного угля, 3,5 % борного шлака, 0,8 % алюминия, а также флюс АН-М-1 следующего состава: 55 % фтористого магния, 40 % фтористого натрия, 5 % фтористого бария. В качестве электродного металла используют проволоки из меди М1 или М0.

Для повышения механических свойств сварного соединения применяют проволоки из медных сплавов БрКМцЗ-1, но в этом случае снижаются тепло- и электропроводность металла шва. Сварку выполняют на постоянном токе обратной полярности.

Сварку стыковых соединений толщиной от 2 до 6 мм выполняют без разделки кромок за один проход со сквозным проваром на графитовой подкладке или флюсовой подушке, с применением выводных планок, в какой-то мере обеспечивающих предварительный подогрев. При большей толщине с V-образным раскрытием кромок под углом 90° без притупления. При использовании сдвоенного электрода металл толщиной до 30 мм можно сваривать без разделки кромок с расположением электродов поперек шва.

Кромка и электродная проволока должны быть тщательно зачищены перед сваркой до металлического блеска и обезжирены. Флюс, используемый для сварки, и флюс, размещенный в подушке, должен быть прокален при температуре 300—400 °С.

Сварка меди в среде защитных газов

Этот способ сварки позволяет получать сварные соединения с высокими свойствами, так как содержание примесей в металле шва минимально. Сварку меди в среде защитных газов выполняют неплавящимся (вольфрамовым) и плавящимся электродами. Применяют аргон высшего сорта, гелий особой чистоты, азот высокой чистоты (с дополнительным его осушением и очисткой силикагелем). Целесообразно использование газовых смесей типа 70—80 % Ar + 20—30 % N₂ для экономии аргона и увеличения производительности (повышается глубина проплавления). Для сварки используют лантанированные или иттрированные вольфрамовые электроды диаметром до 6 мм.

В качестве присадочного металла при сварке неплавящимся и плавящимся электродом применяют проволоку из меди и ее сплавов, как например проволока марок М0, М1, М2 или БрКМцЗ-1, БрХО-7. Свариваемые кромки и проволоку тщательно очищают от окислов и загрязнений: кромки — механическим путем, проволоку — травлением. Для металла толщиной до 5 мм кромки не подготавливают; при толщине металла 6—12 мм производится V-образная и при большей толщине X-образная разделка с углом раскрытия 70—90° для неплавящегося электрода и 60—70° — для плавящегося без притупления. Детали под сварку собирают на прихватах или в специальных жестких приспособлениях. Для уменьшения отвода те-

плоты и нормального формирования корня шва сварку производят на предварительно прокаленных графитовых подкладках, металл толщиной до 5 мм сваривают с подогревом до температуры 350 °С.

С увеличением толщины металла температуру подогрева увеличивают до 600—800 °С. Сварку неплавящимся электродом производят на переменном токе или на постоянном токе прямой полярности. Дугу при сварке неплавящимся электродом необходимо зажигать на угольной или графитовой пластинке и только после разогрева электрода перенести его на свариваемую деталь и начинать сварку.

Азотодуговая сварка меди возможна благодаря тому, что азот по отношению к меди является инертным газом.

При сварке в среде азота эффективная тепловая мощность процесса возрастает в связи с тем, что теплота, забираемая азотом от дуги в момент его диссоциации, передается при его ассоциации над сварочной ванной.

В настоящее время широко применяется полуавтоматическая сварка меди плавящимся электродом в среде азота с использованием обычных сварочных полуавтоматов. Но при этом необходимо увеличить количество подаваемого газа и размер выходного отверстия наконечника горелки. Сварка производится на постоянном токе обрат-

Таблица 73. Режимы стыковой сварки меди неплавящимся электродом в защитных газах на медной или флюсовой подушке

Толщина металла, мм	Зазор между кромками, мм	Сила сварочного тока, А	Напряжение, В	Скорость сварки, м/ч	Температура подогрева, °С	Расход газа, л/мин
<i>Аргондугловая сварка</i>						
2	0—0,5	100—200	10—14	25—30	—	10—12
3	0,5—1,0	200—220	11—15	—	—	12—14
4	1,0—1,5	380—400	12—16	30—35	300—400	12—14
<i>Азотодуговая сварка</i>						
2	0—0,5	70—90	20—24	20—22	—	16—18
3	0,5—1,0	120—140	22—26	20—22	—	18—20
4	1,0—1,5	180—200	24—28	18—20	—	20—22
6	1,0—1,5	260—280	26—30	16—18	—	20—22
8	1,0—1,5	380—400	30—35	12—14	—	20—22
10	1,5—2,0	400—420	31—36	12—14	400—600	22—24

ной полярности от источников питания дуги с жесткой внешней характеристикой без предварительного подогрева. Режимы стыковой сварки меди неплавящимся электродом в защитных газах на медной или флюсовой подушке приведены в табл. 73.

Сварка латуни и бронзы

Латунями называют сплавы меди с цинком. В технике применяют простые латуни, представляющие собой сплавы меди с цинком, и сложные, которые легированы другими элементами.

Латуни принято маркировать буквой Л и цифрой, показывающей содержание меди. Например, латунь Л68 содержит 68 % меди и 32 % цинка. В сложных латунях после буквы Л ставят буквы, условно обозначающие другие элементы: С — свинец, К — кремний, Мц — марганец, Ж — железо и т. д., и цифры, показывающие содержание в латуни меди и тех элементов, которыми легирована латунь. Например, латунь ЛМц58-2 содержит 58 % меди, 2 % марганца, остальное цинк.

Основной трудностью при сварке латуни является то, что в процессе сварки цинк испаряется и сгорает, в результате чего происходит снижение содержания цинка в металле шва и ухудшение его качества (пористость металла, понижение прочности). Кроме того, имеет место насыщение окружающего пространства вредными для здоровья человека парами цинка.

Ручная дуговая сварка латуни может производиться как угольным, так и металлическим электродом.

Сварка латуни малой толщины угольным электродом ведется с погружением конца электрода в расплавленный металл. При этом дуга не гаснет, так как между погруженным концом электрода и поверхностью расплавленного металла образуется полость, заполненная парами цинка. Такой концентрированный нагрев и способ ведения сварки значительно уменьшают выгорание цинка. При сварке латуни угольным электродом применяют такие же режимы и флюсы, что и при сварке меди. В качестве присадочного металла применяют прутки из латуни ЛК62-0,5, ЛМц40-4,5, ЛК80-3 или бронзы БрОМцА8-0,7-0,7.

Ручная дуговая сварка латуни плавящимся электродом выполняется различными электродами в зависимости от марки свариваемых латуней. Электродные стержни по

химическому составу обычно берут близкими к свариваемому металлу. На стержни наносятся покрытия основного типа с большим содержанием активных раскислителей: алюминиевый порошок, графит, содержащий ферросилиций, и др. Сварка в большинстве случаев производится на постоянном токе обратной полярности возможно более короткой дугой без колебаний конца электрода.

Сварка стыковых соединений из латуни производится на прокаленной асбестовой подкладке при толщине металла до 4 мм без скоса кромок. При толщине металла от 4 до 10 мм производится V-образная, а при толщине выше 10 мм X-образная подготовка кромок с раскрытием 60—70°.

Автоматическая сварка латуни под флюсом производится на обычных сварочных автоматах. Сварку ведут на постоянном токе прямой полярности. Электродную проволоку можно применить из латуни марки ЛК80-3, из бронзы марки БрКМц3-1 или из меди марки М1, М2, М3 диаметром 1—3 мм, флюса марок ОСЦ-45, АН-348А и АН-20. До сварки проволоку следует нагартовать. Режимы сварки подбираются в зависимости от толщины свариваемых деталей. Так, сварку стыкового соединения металла толщиной 6 мм на асбестовой или другой подкладке следует производить проволокой диаметром 2 мм при $I_{св} = 350 \div 400$ А, $U_d = 30 \div 33$ В, $v_{п.д} = 18$ м/ч. Возможна также полуавтоматическая сварка латуни под слоем флюса.

Сварка латуни в среде аргона или гелия выполняется вольфрамовым электродом постоянным током прямой полярности на режимах, аналогичных аргонодуговой сварке меди.

Сплавы меди с оловом, алюминием, никелем, бериллием и некоторыми другими элементами называют *бронзами*. Бронзы принято маркировать буквами Бр с начальными буквами добавляемых к меди элементов, затем следуют цифры, показывающие содержание этих элементов в процентах. В зависимости от содержания легирующих элементов бронзы разделяют на деформируемые и литейные. К деформируемым, в частности, относятся сплавы с содержанием до 7—8 % олова — это оловянистые деформируемые бронзы, если в них содержится до 5—7 % алюминия — алюминиевые деформируемые бронзы. К литейным относятся сплавы с большим содержанием легирующего элемента.

Деформируемые бронзы в изделиях толщиной до 4 мм сваривают всеми способами дуговой сварки без предварительного подогрева. Деформируемые бронзы больших толщин и литейные бронзы сваривают с подогревом. Чрезмерный подогрев вреден, в особенности при сварке оловянистых бронз, так как при их подогреве избыточное олово, не вошедшее в твердый раствор и располагающееся по границам зерен, расплавляется, что может явиться причиной разрушения детали даже под действием собственного веса.

При сварке угольным электродом в качестве присадочного металла применяют литые бронзовые стержни диаметром 5—10 мм того же состава, что и свариваемый металл. Флюсы для сварки оловянистых бронз изготовляют на борной основе — бура и борная кислота и др.; для сварки алюминиевых бронз — на основе хлористых и фтористых солей щелочных и щелочно-земельных металлов и криолита, удаляющих оксид алюминия либо препятствующих его образованию. Сварку выполняют постоянным током прямой полярности.

Сварку бронзы металлическим электродом производят электродами, имеющими стержень, близкий по составу к основному металлу, и различные толстые покрытия. Так, например, для сварки изделий из бронзы БрАМц9-2 и наплавки бронзы на уплотнительные поверхности некоторых марок сталей рекомендуются электроды, имеющие стержень из бронзы БрАМц9-2 и покрытие следующего состава: 83,0 % криолита, 5 % хлористого калия, 2,0 % алюминиевой пудры, 8,0 % ферромарганца, 2,0 % бензотонита и натриевое жидкое стекло плотностью 1,38—1,40 (45,0—55,0 % к 100 % сухого состава покрытия). Коэффициент веса покрытия 0,12—0,13. Сварка производится постоянным током обратной полярности. Ток подбирается из расчета 30—40 А на 1 мм диаметра металлического стержня электрода.

Автоматическая сварка бронз плавящимся электродом под флюсом дает вполне удовлетворительные результаты. Сварка алюминиевых бронз БрАМц9-2, АЖМц10-3-1,5 производится сварочной проволокой того же состава под флюсом АН-20, односторонним или двусторонним швом без скоса кромок при толщине металла до 10 мм; при большей толщине — со скосом кромок. Режим сварки подбирается в зависимости от толщины соединяемых деталей

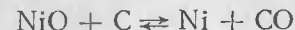
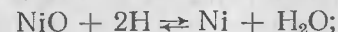
и диаметра сварочной проволоки. Сварка бронзы в среде аргона во многом подобна аргоно-дуговой сварке меди и латуни.

§ 54. СВАРКА НИКЕЛЯ И ЕГО СПЛАВОВ

Никель и его сплавы (содержание 55 % Ni и более) являются важнейшими конструкционными материалами. Благодаря высокой коррозионной стойкости, жаропрочности и жаростойкости их широко используют в химическом, нефтехимическом, энергетическом машиностроении, авиационном, газотурбиностроении и других отраслях промышленности.

Для изготовления химической аппаратуры преимущественно используются никель марки Н-1, содержащий 99,93 % никеля, листы которого в отожженном состоянии имеют предел прочности 42—53 МПа/мм², предел текучести 10—18 МПа/мм², относительное удлинение 35—45 %, твердость 90—100 НВ, и монель-металл, содержащий 65—70 % никеля, 27—29 % меди, 2—3 % железа, 1,2—1,8 % марганца. Сплавы ХН80, ХН60Ю, и ХН75МБТЮ применяются для листовых деталей турбин, работающих при различных температурах. Однако несмотря на малое сродство к кислороду и высокую пластичность сварка никеля затруднена. Причиной этого является понижение стойкости металла шва против кристаллизационных трещин и пор. Главной причиной образования кристаллизационных трещин в металле шва является сера, обладающая большим химическим сродством к никелю и образующая с ним соединение Ni₃S, которое, растворяясь в никеле, образует легкоплавкую эвтектику Ni₃S + Ni с температурой плавления 645 °С. Эвтектика располагается вдоль границ зерен металла и охрупчивает его, что приводит к образованию трещин. Для предотвращения возникновения кристаллизационных трещин в основном металле в сварочных материалах ограничивают содержание вредных примесей и вводят элементы, связывающие серу в более тугоплавкие соединения (содержащие до 5 % Mn и до 0,1 % Mg) и принимают меры к измельчению зерна. Для этого в металл шва вводят в небольшом количестве модификаторы (титан, алюминий, молибден), измельчающие его структуру, и сварку ведут при ограниченной погонной энергии. При многослойных швах последующие швы надо выполнять после полного охлаждения предыдущих.

Большая склонность к образованию пор связана с резким изменением растворимости водорода, кислорода, азота при переходе металла из жидкого в твердое состояние. При наличии в сварочной ванне этих газов могут проходить реакции:



с образованием продуктов, не растворимых в металле и способствующих в процессе кристаллизации образованию пор в металле шва. Азот, попадая в сварочную ванну, частично образует нестойкие нитриды типа NiN и частично — газовую фазу, способствующую образованию пор.

Для предупреждения образования пор необходимо избегать контакта расплавленного металла с атмосферным воздухом, влагой и других загрязнений. Для этого следует производить прокалку электродов, подкладки, флюса, флюсовой подушки; поддув газа для защиты обратной стороны шва, а также очищать поверхность кромок и поверхности основного и присадочного металла от загрязнений.

Металл в сварочной ванне при сварке никеля и его сплавов менее жидкотекуч, чем при сварке стали и поэтому проплавляется на меньшую глубину, что требует увеличения ширины разделки кромок. Для соединения никеля и его сплавов в настоящее время применяют дуговую сварку неплавящимся вольфрамовым и плавящимся электродом в среде защитных газов и механизированную сварку плавящимся электродом под флюсом. Возможна также ручная сварка покрытыми электродами и сварка угольной дугой.

Аргонодуговая сварка

Эта сварка является одним из распространенных способов соединений никеля и его сплавов. При аргонодуговой сварке сварочная ванна надежно защищена от окисления струей аргона, что обеспечивает постоянное и высокое качество сварных соединений. Уменьшение пористости при этом способе сварки никеля, монелей и некоторых жаропрочных сплавов можно достичь добавкой к аргону до 20 % водорода.

При кристаллизации никель может растворить большой объем водорода, поэтому положительное действие водорода в зоне дуги объясняется тем, что кислород воздуха,

находящийся в атмосфере дуги, в первую очередь окисляется водородом и возможность образования закиси никеля в расплавленном металле будет сведена к минимуму, в результате устраняются причины образования пор. Содержание водорода в смеси газов должно быть не более 20 %.

Аргонодуговая сварка никеля и его сплавов вольфрамовым электродом производится на постоянном токе прямой полярности с использованием вольфрамовых прутков ВЛ-10 и ЭВТ-15. Дугу следует зажигать на угольной пластинке и только после разогрева электрода перенести ее на свариваемую деталь и начинать сварку.

Сварку рекомендуется производить на плотно поджатой медной подкладке или с защитой корня шва аргоном. Швы следует накладывать с минимальными поперечными колебаниями электрода и максимально возможной скоростью. При многопроходной сварке последующие швы следует накладывать после полного охлаждения металла, зачистки от шлака и обезжиривания предыдущих проходов. При сварке применяют аргон первого сорта. Состав присадочного металла сварочной проволоки должен быть идентичен составу основного металла. При механизированной сварке в аргоне плавящимся электродом используют постоянный ток обратной полярности.

Сварка под флюсом

Сварка никеля и никелевых сплавов под флюсом производится на постоянном токе обратной полярности. Флюсы должны быть безокислительными и бескислородными типа 48-ОФ-6, АНФ-5. В ряде случаев для никеля используют керамические флюсы, например марки ЖН-1, содержащие 12 % мрамора, 60 % плавикового шпата, 15 % глинозема, 5 % марганца, 2 % титана, 6 % алюминия и 20 % жидкого стекла к массе сухой смеси, а также проволоку из никеля марок НП-1, НП-2.

При использовании проволоки НМц-2,5, вносящей в сварочную ванну достаточное количество раскислителей, следует применять флюсы без раскислителей. Ввиду опасности перегрева основного металла, что может привести к росту зерна, сварку стремятся выполнять валиками небольшого сечения, что предопределяет применение проволоки небольшого диаметра (2—3 мм). Ввиду высокого электрического сопротивления проволоки вылет электрода устанавливают в 1,5—2 раза меньший, чем при сварке низколегированной стальной проволокой.

Ручная дуговая сварка

Эту сварку никеля осуществляют покрытыми электродами чаще всего с основным покрытием. В связи с высоким электрическим сопротивлением никеля, для предупреждения перегрева электрода и получения возможно меньших напряжений сварочный ток принимают равным (20—35) $d_{\text{э}}$. Для уменьшения выгорания полезных примесей поддерживают возможно короткую дугу.

Применяя соответствующие электроды и режимы сварки, можно получить швы с коррозионной стойкостью и другими свойствами не ниже, чем аналогичные свойства основного металла. Для сварки никеля можно использовать электроды марок Н-10, Н-37 «Прогресс», где в качестве электродного стержня используют никелевую проволоку НП1, электроды Н-10, Н-37, изготавливаемые окунанием, не обеспечивают постоянства качества сварных швов. Электроды «Прогресс» могут быть изготовлены как методом окунания, так и опрессовки и имеют покрытия следующего состава: 20 % плавикового шпата, 8 % металлического марганца Мп-1, 6 % алюминиевого порошка ПАП-1, 51 % двуокиси титана, 6 % хлористого натрия, 8 % титанового порошка ИМП-1А, 1 % бентонита. Эти электроды обеспечивают получение металла швов, стойких против образования пор и трещин, с высокими прочностными и коррозионными свойствами. Типы электродов для сварки некоторых никелевых сплавов предусмотрены ГОСТом 10052—75. Дуговую сварку угольным электродом применяют только для тонкого металла, при этом обязательно использование флюса на борной основе и присадочных прутков марки НМц-2,5.

ГЛАВА XII. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЗКА.

НОВЫЕ ВИДЫ СВАРКИ МЕТАЛЛОВ

§ 55. ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ И ВОЗДУШНО-ДУГОВАЯ РЕЗКА МЕТАЛЛОВ

Электродуговая резка металлов основана на выплавлении металла из места реза под действием механического давления сварочной дуги и собственного веса расплавленного металла. Способом электродуговой резки

можно резать большинство сплавов: углеродистые, легированные и высоколегированные стали, чугуны и цветные металлы.

Электродуговая резка металлов может производиться угольными и металлическими толстопокрытыми электродами.

Резка угольными электродами производится только постоянным током прямой полярности. Производительность резки угольным электродом низкая, рез получается широким, с неровными кромками. Для получения более узкого реза применяют пластинчатые графитовые электроды.

Электродуговая резка производится металлическими электродами со специальным толстым покрытием, которое, сгорая, выделяет теплоту или кислород, что ускоряет процесс резки.

Покрытия электродов, предназначенных для резки, должны быть более тугоплавкими, чем для сварки; этим достигается образование на конце электрода более длинного «чехольчика», что концентрирует нагрев и увеличивает производительность резки. В практике для резки широко применяются обычные толстопокрытые электроды массового изготовления. Резка в зависимости от марки применяемых электродов может производиться на постоянном или переменном токе. Резка металлическим электродом применяется главным образом при монтажных работах.

Производительность процесса электродуговой резки определяется массой выплавленного металла в единицу времени:

$$m_B = \alpha_B I_{CB} t,$$

где α_B — коэффициент выплавки, г/(А·ч).

Производительность электродуговой резки зависит от силы тока и угла наклона электрода относительно поверхности обрабатываемого металла. Установлено, что наибольшая производительность будет при угле наклона 10° (рис. 162). Способ резки металлов электрической дугой имеет и недостатки: низкая производительность процесса, недостаточная чистота реза, натеки на нижней кромке, большой расход основного металла.

Воздушно-дуговая строжка и резка объединяет два физических процесса: расплавление металла теплом электрической дуги и выдувание жидкого металла струей

сжатого воздуха. Окисление металла при этом происходит лишь как попутное явление, не влияющее на процесс резки.

При правильном ведении процесса расплавленный металл полностью удаляется, и поверхность основного металла вследствие кратковременности воздействия нагрева не изменяет своего состава. Воздушно-дуговая строжка применяется при поверхностной обработке металла для выплавки дефектных участков корня сварных швов, резки заклепок, разделки трещин, выплавки пороков в отливках, для V-образных подготовок кромок под сварку и др. Преимущество воздушно-дуговой резки — ее экономичность, возможность использования не дефицитных материалов и простота оборудования.

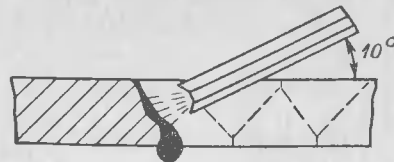


Рис. 162. Дуговая резка металлическим электродом

При воздушно-дуговой резке и строжке используют угольные электроды диаметром 6—12 мм, длиной 250 мм и больше. Электроды при резке нагреваются до белого свечения и быстро «сгорают». При этом стержень заостряется и образует конус. Меньше нагреваются и более устойчивы в работе угольные омедненные электроды, а также угольно-графитовые электроды. Воздушно-дуговая строжка и резка наиболее производительна при использовании постоянного тока обратной полярности.

При дуговой резке и строжке на прямой полярности на поверхности в месте действия дуги образуется чашеобразное углубление, по которому растекается расплавленный металл (рис. 163, а); удаление металла воздухом затруднено; производительность низкая.

При дуге обратной полярности расплавленный металл образует форму конического выступа (рис. 163, б) в связи с тем, что движение потока электронов, направленное от катода к аноду (в данном случае от изделия), как бы центрирует массу расплавленного металла, стремясь увлечь металл в своем движении. Металл, расплавленный дугой обратной полярности, более подвижен и текуч. Струя воздуха легко удаляет жидкий металл.

Основным рабочим инструментом является резак. В зависимости от назначения и метода подачи воздуха

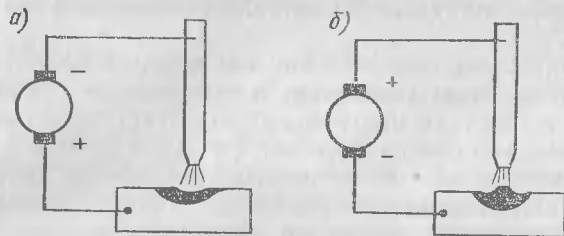


Рис. 163. Расположение металла расплавленной ванны при горении дуги разной полярности

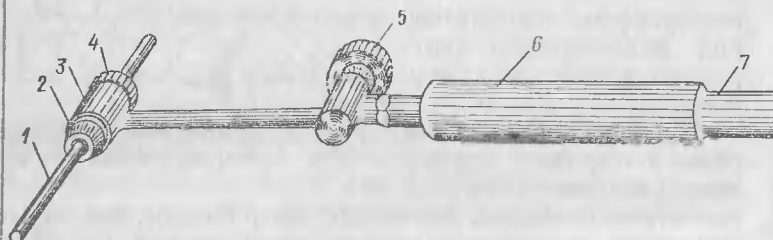


Рис. 164. Резак для воздушно-дуговой резки с подачей воздуха вокруг электрода, закрепленного в цанге:

1 — угольный электрод; 2 — наконечник; 3 — головка держателя с цангами; 4 — моховик для зажима цанги с электродом; 5 — вентиль для регулирования подачи воздуха; 6 — рукоятка; 7 — шланг с кабелем подачи воздуха и питания дуги током

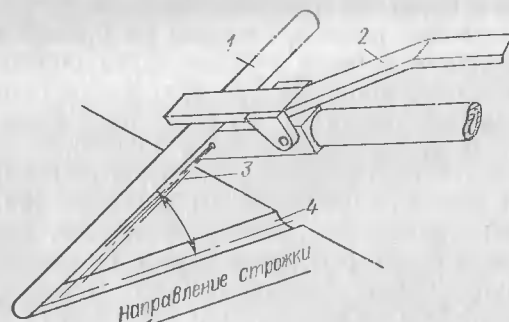


Рис. 165. Воздушно-дуговая строжка:

1 — электрод; 2 — резак; 3 — воздушная струя; 4 — канавка

применяют в основном два вида резаков: 1) резак с обтекаемой подачей воздуха (рис. 164); 2) резак с боковой подачей воздуха (рис. 165). Резаком с обтекаемой подачей воздуха можно производить резку в любом направлении: справа налево, слева направо, от себя, на себя. Недостатком резака с обтекаемой подачей воздуха является круговое обдувание электрода воздухом, что вызывает большой расход угольных электродов. Резку резаком с боковой подачей воздуха ведут в одном направлении (обычно справа налево), а воздух подается параллельно электроду сзади. При этом уменьшается расход воздуха.

Производительность воздушно-дуговой резки прямо пропорциональна силе тока, т. е. целесообразно применять мощные сварочные источники постоянного тока. Значения тока в зависимости от диаметра электрода приведены ниже:

Диаметр электрода, мм	6	8	10	12
Сила тока, А	120—250	160—320	250—400	350—500

Питание резака сжатым воздухом производится от цеховой сети под давлением 0,4—0,6 МПа или от сети индивидуального компрессора. Если давление больше — дуга обрывается, а если меньше — металл слабо выдувается.

Вылет электрода не должен превышать 100 мм. При работе электрод «обгорает» и периодически должен выдвигаться на тот же размер. Воздушный вентиль открывают до начала резки. Возбуждение дуги производится при поступлении воздуха. Выплавка металла начинается немедленно с появлением дуги, поэтому дугу надо возбуждать в намеченной точке начала строжки. Во всех случаях строжки электрод устанавливается с наклоном 35—40° к поверхности металла. При использовании резаков с боковой подачей воздуха (см. рис. 165) воздушные отверстия должны быть внизу по отношению к рабочему концу угольного электрода в призме электрододержателя. Движение резака производится в направлении конца электрода. После появления дуги резак движется вперед с постоянным касанием передней кромки расплавленной ванны. Нажимать на электрод не следует, так как при нагреве он становится непрочным и может легко сломаться. Скорость перемещения принимается примерно 500—2000 мм/мин, а глубина канавки увеличивается с возрастанием силы тока, увеличением угла между элек-

Таблица 74. Режимы воздушно-дуговой резки

Диаметр электрода, мм	Сила тока, А	Скорость резки (мм/мин) при толщине разрезаемой стали, мм			
		5	8	15	20
6	150	600	—	—	—
	300	1200	600	—	—
8	150	1000	400	—	—
	300	1000	500	—	—
	400	2000	800	400	—
10	300	1200	—	—	—
	400	1600	600	300	—
	500	2000	1000	500	500

тродом и металлом и с уменьшением скорости продвижения электрода. При устойчивом ведении электрода канавка получается постоянной

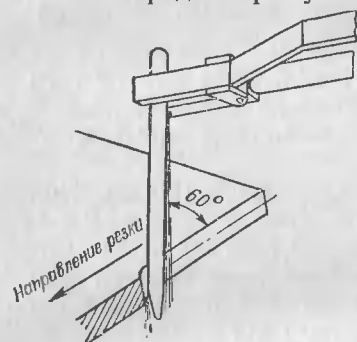


Рис. 166. Разделительная воздушно-дуговая резка

формы с ровной поверхностью и без брызг расплавленного металла. Если ширину канавки требуется получить больше диаметра электрода, то строжка ведется с поперечными колебаниями по ширине выплавки.

При резке (рис. 166) электрод располагается под углом 45—60° по отношению к изделию, причем электрод проходит через всю толщину металла. Скорость резки увеличивается

с возрастанием силы тока и уменьшением толщины разрезаемого металла. Однако при равных условиях она уменьшается с увеличением диаметра электрода (табл. 74).

§ 56. ДУГОВАЯ ПОДВОДНАЯ СВАРКА И РЕЗКА МЕТАЛЛОВ

Подводная сварка и резка имеет большое значение при строительстве гидротехнических сооружений, ремонте судов и подводной части металлических конструкций портовых, нефтепромысловых и других сооружений.

Подводная дуговая сварка производится преимущественно стальными толстопокрытыми электродами с гидроизоляцией, например электродами марки ЭПС-52, имеющими стержень из малоуглеродистой стали и толстое покрытие следующего состава: 3 % оксида титана (IV), 28 % железной руды, 29 % полевого шпата, 5 % ферротитана, 50 % ферромарганца, 5 % крахмала, 20—25 % жидкого стекла. Гидроизоляция может быть осуществлена расплавленным парафином, раствором целлулоида в ацетоне или специальными лаками. Коэффициент покрытия должен быть в пределах 0,35—0,40, коэффициент наплавки этими электродами составляет 8—9 г/(А·ч).

Сущность процесса сварки под водой состоит в том, что под действием теплоты сварочной дуги испаряется и разлагается окружающая дугу вода, расплавляется и частично испаряется материал изделия, электрода и покрытия, создавая вокруг дуги непрерывно возобновляющуюся газовую полость. Расплавленный металл при этом образует валик или шов. Образующийся при горении дуги под водой газ состоит из 65—86 % водорода, 15—25 % угарного газа, 3—5 % углекислого газа и незначительного количества кислорода.

Пары металла и материалов покрытия, соприкасаясь с водной средой, конденсируются в мельчайшие частицы, состоящие преимущественно из оксидов железа и образующие в воде коллоидный раствор темно-бурого цвета, не отстаивающийся много часов. Поэтому вокруг горячей под водой дуги видимость ограничена и практически виден лишь участок в зоне горения дуги (в радиусе 10—15 мм). Если при этом учесть, что сварка под водой производится в тяжелом или мягком водолазном снаряжении, то станет ясным, насколько она сложнее сварки на воздухе. Молекулярный водород, находящийся в столбе дуги, горячей под водой, диссоциирует на атомарный водород:



Этот процесс сопровождается поглощением теплоты дуги, что приводит к снижению термоэлектронной эмиссии с катода и затрудняет зажигание дуги. Поэтому для создания нормальных условий зажигания дуги под водой, наряду с введением в покрытие материалов, содержащих элементы с низким потенциалом ионизации, требуется, чтобы напряжения холостого хода источника

питания дуги было более высоким (70—85 В). На стабильность горения дуги влияет плотность тока, которая при ручной сварке составляет 12—20 А/мм², а при полуавтоматической сварке в СО₂ проволокой диаметром 1—2 мм достигает 200—250 А/мм². Чем больше плотность тока, тем стабильнее горение дуги, так как термоэлектронная эмиссия интенсивна. На устойчивость горения дуги под водой оказывает влияние и чехольчик, который образуется на конце электрода в результате некоторого запаздывания плавления электродного покрытия по сравнению с плавлением стержня, так как он способствует сохранению газовой полости, в которой горит дуга. Сварка под водой производится постоянным током прямой полярности.

Для сварки под водой применяются специальные электрододержатели, поверхность которых должна быть тщательно изолирована. При нарушении изоляции утечка тока в морской воде может достигать нескольких десятков ампер, что вследствие электролиза вызывает разрушение его (материала) металлических частей и снижает устойчивость горения дуги.

Сварка под водой возможна во всех пространственных положениях и на всех достижимых глубинах, ограничиваемых лишь возможностями человеческого организма и совершенством водолазного снаряжения. С увеличением глубины давление воды на газовую полость и столб дуги возрастает, увеличивается проникающая способность дуги, и металл при сварке под водой проплавляется больше, чем при сварке на воздухе. Силу сварочного тока для сварки под водой подбирают так же, как и для сварки на воздухе, но она должна быть на 15—20 % выше.

Сварка производится с опиранием на чехольчик электрода, без поперечных колебаний, со скоростью перемещения электрода в зависимости от требуемого сечения валика. В связи с плохой видимостью под водой желательно, чтобы сварное соединение имело кромку, касаясь которой можно было бы перемещать электрод по линии наложения шва. Поэтому для подводной сварки предпочтительнее применение нахлесточных соединений и соединений впритык.

Металл, наплавленный под водой, имеет мелкозернистую структуру, незначительное содержание азота, но содержание водорода относительно велико. Последнее объясняется тем, что при высокой температуре водород

растворяется в жидком металле, образуя растворы внедрения. В связи с очень быстрым охлаждением и образованием корки на поверхности валика водород не успевает выделиться из металла. В момент аллотропических превращений, когда растворимость водорода в стали резко падает, происходит быстрый процесс его выделения. Водород заполняет несплошности, образуя поры и трещины — флокены. Кроме того, насыщение металла водородом приводит к резкому снижению его пластических свойств: $\delta = 4—6 \%$; $KCU = 10—25$ Дж/см², угол загиба 25—35°. Но временное сопротивление металла σ_n , наплавленного под водой, достаточно высоко и составляет 400—550 МПа/мм².

Дуговая резка под водой может производиться кислородно-дуговым или воздушно-дуговым методом. Наибольшее применение имеет кислородно-дуговой метод, который производится с применением трубчатых толстопокрывтых электродов типа ЭПР-1. При подаче на нагретый или расплавленный металл струи кислорода он сгорает, и жидкие оксиды удаляются из полости (рис. 167).

Перед началом резки и по окончании плавления электрода необходимо соблюдать определенную последовательность в подаче газа и зажигания дуги. Это связано с тем, что газы, заполняющие пузырь при горении дуги под водой, находятся под давлением окружающей среды, и если зажечь дугу между трубчатым электродом и изделием без предварительной подачи воздуха или кислорода, то газы устремятся в канал электрода, увлекая за собой капли расплавленного металла. Это нарушит

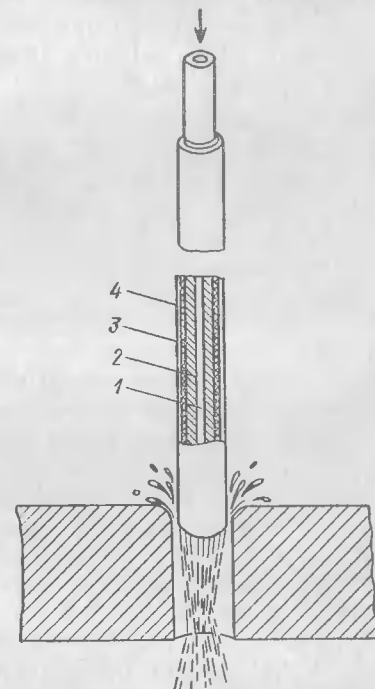


Рис. 167. Кислородно-дуговая резка:

1 — канал; 2 — стальной стержень; 3 — покрытие; 4 — гидроизоляция

нормальный процесс горения дуги. То же самое происходит при обрыве дуги с предварительным прекращением подачи кислорода. Поэтому при зажигании дуги под водой между трубчатым электродом и изделием сначала следует подать газ в канал трубчатого электрода, а затем коротким замыканием зажечь дугу. При прекращении процесса резки или при смене электрода следует сначала оборвать дугу, а затем прервать подачу газа. Зажигать дугу необходимо у кромки разрезаемого металла.

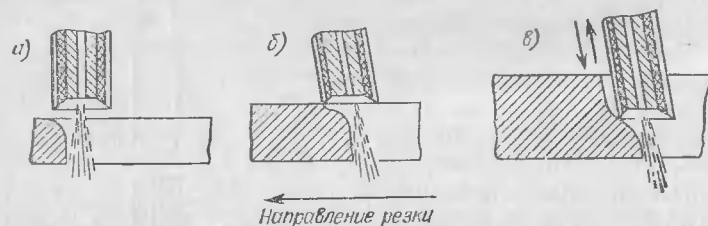


Рис. 168. Положение конца электрода при различных методах кислородно-дуговой резки

В месте начала резки электрод следует задержать до тех пор, пока не будет прорезана вся толщина металла. Если же операция начинается с середины изделия, то после зажигания дуги электрод необходимо удерживать на одном месте до образования сквозного отверстия. После этого электроду сообщаются два движения — поступательное по оси для поддержания нормальной длины дуги и продольное — по линии реза.

Резку можно производить тремя способами. Метод резки с поддержанием видимой дуги (рис. 168, а) применяется при малой толщине разрезаемого материала (2—5 мм). При этом после зажигания дуги расстояние от чехольчика до изделия составляет 2—3 мм, и электрод перемещается равномерно вдоль линии реза. Из-за плохой видимости и значительной трудности поддержания постоянной видимой дуги этот метод применяется редко. Большим преимуществом пользуется метод опирания (рис. 168, б). Он заключается в том, что после зажигания дуги и возникновения нормального процесса резки резчик опирает чехольчик электрода на металл, поддерживая его под углом 10—15° в сторону движения.

Этот метод прост, и удобен в особенности при применении шаблонов.

Метод углубления электрода (рис. 168, в) рекомендуется при резке больших толщин.

Резка под водой производится на постоянном токе от источников питания, обеспечивающих сварочный ток до 500 А, на режимах в зависимости от толщины разрезаемого металла. Для резки под водой применяются специальные резаки.

§ 57. СВАРКА И РЕЗКА СЖАТОЙ ДУГОЙ

Температура столба дуги — плазмы зависит от многих факторов, в том числе от упругих соударений частиц в ней. Чем их больше, тем выше температура. Пропустим дугу через наконечник, охлаждаемый водой, и заставим столб дуги сжаться, т. е. уменьшить свое сечение (см. рис. 10). Сварочный ток и число электронов, проходящих по сечению столба дуги, не изменятся, но число упругих и неупругих соударений частиц увеличится. Температура столба дуги и степень ионизации возрастают. Плазма становится более высокотемпературной и в определенных условиях может достигать температур до 20 000 °С.

Плазму по сечению можно разделить на три зоны: присоевая зона столба дуги — сильно ионизированный газ, периферийная зона столба дуги — менее нагретый и частично ионизированный газ и третья зона — холодный газ, образующий тонкую кольцевидную оболочку, которая предохраняет дугу от непосредственного контакта со стенками канала наконечника.

При сварке сжатой дугой происходит следующая картина: центральная часть столба дуги проникает через всю толщину металла, образуя сквозное проплавление. Горячие газы периферийной зоны не обладают достаточной температурой и кинетической энергией для такого же проплавления. Они образуют обыкновенную сварочную ванну в виде чаши. Поэтому при плазменной сварке толщин больше 4—5 мм в поперечном сечении проплавление имеет форму «рюмки».

При плазменной обработке металла диаметр канала наконечника и расход плазмообразующего газа являются элементами режима. Чрезмерное уменьшение диаметра канала наконечника или значительное увеличение количества плазмообразующего газа приводит к двойному

дугообразованию, когда одновременно горят две дуги: одна между вольфрамовым электродом и наконечником, другая — между наконечником и изделием. Это приводит к разрушению наконечника. Поэтому дополнительное сжатие плазменной струи производится газами на выходе ее из канала мундштука («газовая фокусировка») следующими способами:

1) струями газа, направленными под углом к оси дуги по кольцевому каналу (рис. 169, а); струи газа должны скрещиваться в непосредственной близости от свариваемых кромок;

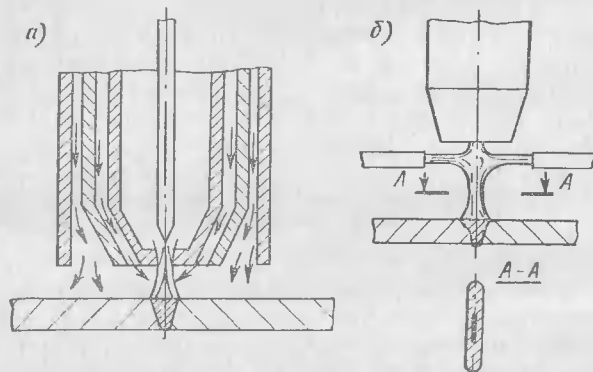


Рис. 169. Схемы сжатия плазменной струи для получения различных форм факела

2) двумя встречными струями газа, направленными поперек столба дуги (рис. 169, б).

Приведенные выше схемы формирования столба дуги позволяют увеличить эффективную мощность сварки сжатой дугой. Одной из особенностей сварки сжатой дугой, которая обычно производится на весу, является образование проплавления типа замочной скважины (рис. 169, б). Проплавление такого типа характеризуется образованием малого отверстия, которое вместе с плазменной струей перемещается вдоль шва. Расплавленный металл располагается непосредственно позади этого отверстия (за счет сил поверхностного натяжения) и образует шов. При оптимальных режимах (сила тока, объем плазмообразующего газа, диаметр канала мундштука и т. д.) с обратной стороны шва получается валик шириной 1—3 мм и высотой 0,5—1,5 мм, он указывается на сплошное проплавление.

При сварке сжатой дугой стыковых соединений толщиной до 10—15 мм сварку можно вести за один проход без присадочной проволоки и без разделки кромок. Получается сквозное проплавление, шов выпуклости не имеет. При сварке соединений больших толщин следует производить подготовку кромок с суммарным углом раскрытия 30° и притуплением 7—10 мм, сборку производят без зазора. Первый проход выполняют без присадочного материала со сквозным проплавлением, последующие проходы производят с применением присадочного материала: его можно вводить в начале и в конце сварочной ванны. При этом плазменную струю следует отрегулировать так, чтобы не было сквозного проплавления, и процесс шел аналогично аргонодуговой сварке.

Сжатой дугой можно сваривать соединения толщиной 0,1 мм и меньше. В этом случае уже при токе в 1 А образуется плазменная струя, которая имеет игольчатую форму. Горелки для сварки таких толщин рассчитаны на ток до 7 А. Режимы механизированной сварки сжатой дугой без разделки кромок за один проход для различных материалов приведены в табл. 75.

Резка плазменной струей заключается в том, что под воздействием теплоты электрической дуги металл обра-

Таблица 75. Режимы механизированной сварки сжатой дугой без разделки кромок за один проход

Материал	Толщина, мм	Сила сварочного тока, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Объемный расход аргона, л/мин	
					плазмообразующего	защитного и фокусирующего
Коррозионно-стойкая сталь	1	75—100	16—18	45—75	0,2—0,8	3
	3	140	22—24	22	1	7
	10	280	29	10	3,5	9
Медь	1,5	110	18—19	20	1	4
Алюминий	4	120	20—22	30	1,2	4
Титан	3	185	21	31	0,25	6,8
	10	175	30	6	1,2	9
	15	240	26	11	1,5	10—11

батываемого изделия плавится, а струя азота или какого-либо газа, вытекающая из мундштука, удаляет расплавленный металл из зоны реза.

Газы, применяемые при резке сжатой дугой, должны обеспечивать следующие функции:

1) защиту вольфрамового электрода; эту функцию лучше других газов выполняет аргон;

2) обеспечение стабилизации дуги; в этом случае аргон экономически невыгоден, так как происходит очень большой расход газа. Наилучшим газом является азот, который можно использовать в больших количествах вследствие его дешевизны;

3) обеспечение более эффективной передачи теплоты дуги в изделие за счет диссоциации и ассоциации двухатомных газов (азот, водород).

Следовательно, при резке вольфрамовым электродом необходимо применять различные газы. Один для предохранения электрода и мундштука от разрушения (обычно аргон), второй — для обеспечения резки с максимальной скоростью (азот, водород, воздух).

В качестве электрода применяется вольфрамовый прут с присадкой лантана. Конец электрода затачивается под углом 60—70°. Для сохранения оптимальной формы плазменной струи требуется правильная центровка электрода относительно выходного отверстия мундштука.

Резка производится на прямой полярности. В процессе резки необходимо следить за постоянным охлаждением наконечника водой (объемный расход воды не менее 3—4 л/мин). В начале резки расстояние от мундштука до изделия должно быть 12—14 мм для уменьшения «броска» тока в момент возникновения режущей дуги, в процессе резки это расстояние не должно превышать 6—8 мм.

Резку рекомендуется производить справа налево. Режимы резки сжатой дугой в среде азота приведены в табл. 76.

В последнее время в промышленности находит все большее применение воздушно-плазменная резка, повышающая производительность за счет взаимодействия кислорода воздуха с разрезаемым металлом. При этом методе используются медные охлаждаемые электроды с вваренной вставкой из циркония или гафния. Режим воздушно-плазменной резки углеродистых сталей толщиной 10—15 мм следующий: сила тока 150—250 А; напряжение на

Таблица 76. Режимы резки сжатой дугой углеродистых сталей в среде азота

Толщина разрезаемого металла, мм	Объемный расход азота, л/мин	Сила тока, А	Напряжение дуги, В	Скорость резки, мм/мин	Диаметр мундштука	Ширина реза
					мм	
5	55—60	290	165	1150	3	6
12	55—60	370	170	570	3	6
30	80—90	500	200	300	4	10

дуге 150—250 В; скорость резки 2,5—3,0 м/мин; объемный расход воздуха 30—40 л/мин; расстояние от наконечника до изделия 12—25 мм.

§ 58. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА

Схема формирования пучка электронов при электронно-лучевой сварке была рассмотрена выше (см. рис. 12). С помощью таких установок в настоящее время производится множество различных видов сварочных работ, например:

1) сварка изделий из тугоплавких и химически активных металлов толщиной от нескольких десятых до десятков и более миллиметров;

2) соединение узлов электронных приборов, корпусов мощных электронных ламп и т. д.;

3) выполнение соединений в труднодоступных местах;

4) соединение изделий из разнородных (тугоплавких и обычных) металлов, когда при сварке другими способами встречаются затруднения из-за ограниченной взаимной растворимости этих металлов в жидком состоянии или образования хрупких химических соединений.

Перечисленные виды сварочных работ можно осуществлять электронно-лучевой сваркой благодаря преимуществам, которыми она обладает перед другими методами сварки. Основными из них являются:

- 1) высокая плотность концентрации энергии;
- 2) незначительная деформация свариваемого изделия;
- 3) быстрое включение и выключение источника плавящего;
- 4) высокая скорость управления электронным лучом;
- 5) химическая чистота в месте обработки;

- 6) большая скорость сварки;
- 7) отсутствие давления на жидкий металл.

Все это обеспечивает хорошее формирование шва, и прожоги не наблюдаются даже при сварке деталей очень малых толщин. Сварные швы получаются вакуумно-плотными, практически без изменения физико-механических и химических свойств свариваемого металла в зоне сварки.

Режим электронно-лучевой сварки складывается из следующих величин: ускоряющее напряжение (кВ); сила тока электронного луча (мА); скорость сварки (м/ч).

В табл. 77 приведены режимы стыковой сварки некоторых металлов без разделки кромок. Но не только обычные стыковые соединения позволяет осуществлять электронно-лучевая сварка. Этим методом можно выполнять и другие виды соединений (рис. 170).

Т-образное соединение осуществляется способом глубинного проплавления, которое обычными методами сварки осуществить не представляется возможным. Электронный луч, пройдя сверху через горизонтальный лист металла, прочно соединяет его сварным швом с расположенным под ним вертикальным листом. Таким же образом

Таблица 77. Режимы электронно-лучевой сварки стыковых соединений

Материал	Толщина, мм	Режим сварки			Приблизительная ширина шва, мм
		Ускоряющее напряжение $U_{\text{уск}}$, кВ	Сила тока, мА	Скорость сварки, м/ч	
Вольфрам	0,5	18—20	40—50	60	1,0
	1,0	20—22	75—80	50	1,5
Молибден	1,0	18—20	60—80	60—75	1,5
	2,0	20—22	130—150	50	3,0
Ниобий	1,0	18—20	50	60	1,5
Сталь марки Х18Н9Т	1,5	18—20	50—60	60—70	2
	10	18—20	240	50	4
	20	20—22	270	50	7
	35	20—22	500	20	7
Молибден и вольфрам	0,5—0,5	18—20	45—50	35—50	1,0

можно осуществить сварку очень тонкой фольги с толстым листовым материалом.

Глубинная сварка может быть осуществлена только при такой высокой плотности энергии, при которой свариваемый металл не только плавится, но и испаряется.

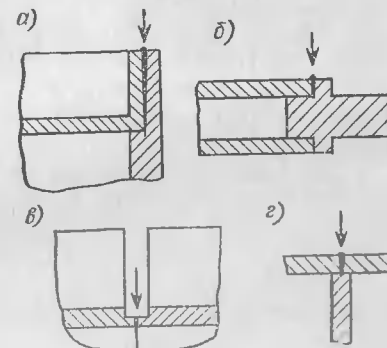


Рис. 170. Некоторые типы соединений, выполненные электронно-лучевой сваркой: а, б — сварка «в замок»; в — сварка в узких разделках и труднодоступных местах; г — сварка Т-образных соединений

При меньшей плотности энергии зона плавления аналогична зоне плавления при электродуговой сварке. На рис. 171 показаны зоны плавления при обычной электро-



Рис. 171. Зоны плавления стали марки 08Х18Н9Т

дуговой сварке (а) и при глубинной сварке электронным лучом (б) стали марки 08Х18Н9Т.

В настоящее время разрабатываются пути совершенствования электронно-лучевых сварочных установок. Например, за счет применения перемещающихся вакуумных камер, позволяющих сваривать швы большой длины, что особенно важно для соединения деталей корпусов космических кораблей из тугоплавких металлов. Можно полагать, что в будущем электронно-лучевая сварка найдет применение для создания крупных базовых станций — спутников в космосе.

Кроме лазера, в котором в качестве активного вещества используется твердый кристалл рубина (см. рис. 14), созданы следующие: полупроводниковые, газовые и жидкостные.

В *полупроводниковых лазерах* активным веществом является полупроводниковый элемент. Эти лазеры дают возможность непосредственно преобразовывать энергию электрического тока в энергию света. Благодаря такому преобразованию энергии они имеют высокий КПД.

В *газовых лазерах* в качестве активного вещества используются различные газы или их смеси. Основное их достоинство то, что они могут работать в непрерывном режиме, т. е. дают не импульсный, а непрерывный луч.

В *жидкостных лазерах* в качестве активного вещества используются специальные жидкости с добавками редкоземельных элементов.

Эти лазеры имеют ряд преимуществ перед другими лазерами. Основные из них заключаются в том, что они полностью освобождают от проблем, связанных с выращиванием монокристаллов и их обработкой; при этом также облегчается охлаждение лазера за счет возможности циркуляции рабочей жидкости. Однако у всех перечисленных видов лазеров основной принцип получения стимулированного излучения остается тот же, что и в твердотельном рубиновом.

Лазеры находят широкое применение в различных областях науки и техники, в том числе и для производства различных сварочных работ. В настоящее время для сварки используются импульсные лазеры на рубине или неодимовом стекле, например лазеры марок «Свет-30», «Искра-8». В комплект установки для лазерной сварки входят: излучающий генератор, блок питания, стол с конденсаторами и стереоскопический микроскоп. Рассмотрим принципиальную схему излучающего генератора (рис. 172).

Генератор предназначен для преобразования электрической энергии, запасенной в блоке конденсаторов, в узконаправленный мощный световой луч. Основным узлом генератора является осветительная камера 1, внутри которой размещен кристалл рубина 5. В камере параллельно кристаллу установлена импульсная лампа 6, на концы которой подводится высокое напряжение. Внутри поверхность камеры отполирована и является

отражателем света. В камеру подается сжатый воздух для охлаждения кристалла рубина, после чего воздух уходит в атмосферу, так как камера не герметизирована.

Для формирования испускаемого кристаллом рубина излучения и направления его на место сварки служит формирующая оптическая система, состоящая из призмы 7, линзы и сменного объектива 10. Формирующая система

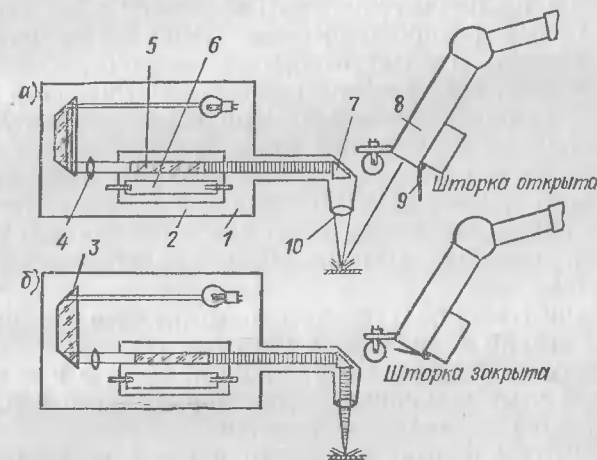


Рис. 172. Принципиальная схема излучающего генератора лазерной сварочной установки: а — настройка генератора перед сваркой; б — сварка (затвор закрыт)

снабжена сменными объективами, которые формируют параллельный пучок света, испускаемый генератором, в пятно диаметром от 0,25 до 0,05 мм.

Для настройки генератора используется оптическое устройство, состоящее из осветителя 2, призмы двойного преломления 3 и конденсаторной линзы 4. Луч света от осветителя проходит через рубин и оптическую систему генератора, имитируя прохождение излучения от кристалла рубина (рис. 172, а).

Для визуального наблюдения за местом сварки при наведении луча подсветки на место сварки и для осмотра сваренных элементов служит стереоскопический микроскоп 8. Для защиты глаз оператора, работающего на установке, от излучения генератора в момент сварки предусмотрен затвор 9, приводимый в движение электромагнитом.

С помощью лазера можно сваривать различные металлы и сплавы как однородные, так и разнородные: из меди, никеля, тантала, титана, алюминия, нержавеющей стали, вольфрама и т. д. Лазерная сварка применяется для соединения контактов различных элементов с проводниками на печатных платах, для соединения внутренних выводов транзисторов, для присоединения термодатчиков к термочувствительным элементам и для других целей. Самым распространенным видом соединения является точечное (нахлесточное): заклепочное, сквозное, многоточечное. При необходимости соединения двух плоских элементов непрерывным швом последний получают перекрытием на 50 % одной точки другой.

Особенностью лазерной сварки является возможность производить сварку сквозь прозрачные оболочки (стекло и т. д.). Режим лазерной сварки складывается из следующих основных величин: энергии (Дж) и длительности импульса (с).

Лазерная сварка существенно отличается от других методов сварки и имеет ряд преимуществ:

1) малую тепловую энергию, поглощаемую изделием, благодаря чему уменьшается зона термического влияния и снижаются деформации изделия;

2) высокую плотность энергии в пятне нагрева, позволяющую соединять разнородные металлы с различными физическими свойствами;

3) шов формируется за тысячные доли секунды, что положительно влияет на химический состав свариваемых металлов;

4) процесс сварки легко поддается автоматизации.

В дальнейшем лазерная сварка найдет широкое применение как один из методов получения микросоединений, резки металлов, получения отверстий микронных размеров, а также для других технических целей.

ГЛАВА XIII. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

§ 60. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Создание наиболее экономичных сварных конструкций требует комплексного конструктивного технологического проектирования, при котором вопросы кон-

структивного плана решаются одновременно с вопросами технологии. Проектирование невозможно без учета особенностей технологии, а одним из важнейших моментов становится соблюдение принципов технологичности конструкций.

Технологичной считается конструкция, обеспечивающая наиболее простое, быстрое и экономичное изготовление, при соблюдении необходимой прочности, устойчивости, выносливости и других эксплуатационных качеств. Достижение высокой технологичности является основной целью технологической отработки конструкций, проводимой в период подготовки производства.

В практике современного машиностроения существуют два метода отработки конструкции на технологичность. Первый заключается в анализе технической документации после окончания проектирования и разработки рабочего проекта изделия. При этом производится анализ имеющейся документации с точки зрения требований технологичности, предъявляемых производством конкретного завода-изготовителя, после чего в техническую документацию вносятся лишь незначительные изменения, мало влияющие на конструктивные решения. Разработка конструкции к этому моменту практически завершена, эффективность такого метода невысокая.

По второму методу обработка технологичности конструкций является непрерывным процессом, начинающимся с жизнью проекта изделия и продолжающимся на всех стадиях его проектирования и изготовления. Такая система участия технологов в разработке конструкции, при которой осуществляется постоянный контакт с конструкторами при проектировании и изготовлении изделия, позволяет улучшить качество конструкции, дает возможность сократить время подготовки производства и позволяет конструктору и технологу правильно решить следующие задачи:

1) разработать конструкцию с учетом технологических возможностей производства и принятой системой унификации и нормализации деталей и узлов (сборочных единиц);

2) выбрать более простые и удобные для изготовления формы деталей;

3) конструктивно проработать оформление всех сварных соединений с указанием характера их обработки, форм подготовки кромок, допусков на размеры и при-

пусков на обработку после сварки и некоторых других данных;

4) наметить систему расчленения конструкции на основные узлы, разработки общих схем сборки и сварки;

5) наметить технологические мероприятия по предотвращению и устранению сварочных напряжений и деформаций;

6) предусмотреть возможно больший объем механизированных способов сварки;

7) наметить и эскизно разработать конструкции специальных приспособлений оснастки и др.

В результате совместной работы конструктора и технолога по окончании проектирования наряду с разработанной конструкцией устанавливается принципиальная технология его изготовления в соответствии с чертежами, действующими стандартами и ТУ.

Техническими условиями называют требования, которые предъявляются к изделиям при их изготовлении. ТУ бывают общие и дополнительные. В общих ТУ указывается:

1) материал будущей конструкции или детали и допустимые способы его обработки;

2) допуски отклонений на размеры, которые необходимо выдерживать по чертежам;

3) допуски отклонений от прямолинейности изготовленной конструкции, ее отдельных узлов и элементов вследствие деформаций от сварки;

4) типы электродов, применяемых при сварке данной конструкции;

5) способы контроля заготовок, испытания конструкций и сварных швов.

Дополнительные ТУ обычно отражаются в сборочных и детальных чертежах изготавливаемой конструкции.

На основании принципиальной технологии разрабатывается рабочая технология, которая отражается в рабочей технологической документации. Степень подробности изложения технологического процесса в рабочей документации зависит от ряда условий: типа производства, сложности конструкции, ее ответственности, от уровня оснащения цеха приспособлениями, квалификации рабочих.

Технологическая карта — основной производственный документ, в котором приведены все данные по заготовке,

сборке и сварке изделия. При составлении технологической карты технолог должен придерживаться схемы, утвержденной принципиальной технологией. Составленная карта должна быть понятной без пояснительной записки.

Технологические карты составляют на заготовку, сборку и сварку. При этом существуют две схемы изложения технологического процесса сборки и сварки:

1. Сборочные и сварочные операции излагаются отдельно в двух разных технологических документах.

В документе на сборку подробно описываются сборочные операции, а относительно сварочных дается краткое указание «сварить».

В документе на сварку, наоборот, сварочные операции описываются подробно, а сборочные формулируются словом «собрать». Таким образом, в обоих документах устанавливается одинаковая очередность операций.

2. Обе операции — сборка и сварка — излагаются подробно в одном документе, чередуясь в том порядке, какой требуется для изготовления изделия.

В большинстве случаев технологию сборки и сварки производят в одной карте.

После подготовки необходимой технологической документации процесс изготовления металлоконструкции начинается с заготовки деталей, которая обычно складывается из следующих операций: составления схем раскроя, предварительной правки и чистки, разметки, наметки, маркировки, резки, окончательной правки, образования отверстий, гибки.

В современных цехах по производству сварных металлоконструкций после предварительной правки применяют высокопроизводительные способы очистки: дробометный (одновременно с двух сторон) или химический (травлением и пассивированием).

Предварительная разработка схемы раскроя металла, особенно листового, имеет целью получение минимальных отходов, для этого разметчик обычно изготавливает шаблоны деталей.

Наметка заключается в переносе необходимых для изготовления детали размеров с шаблона на материал. Маркировка — процесс нанесения на размеченную или намеченную деталь марки. Марка содержит номер заказа, номер чертежа, номер детали, перечень условных буквенных обозначений операций обработки.

Резка металла производится ножницами, автоматическими, газорезательными машинами и ручными резаками. Для придания детали необходимой формы на соответствующих вальцах осуществляется ее гибка и вальцовка.

§ 61. СБОРКА СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

После заготовки детали сварных конструкций поступают на сборку. Сборкой называется процесс последовательного соединения деталей между собой в порядке, предусмотренном технологическим процессом и чертежом, для последующей сварки.

Основная цель технологического процесса сборки заключается в определении наиболее выгодной последовательности сборки отдельных деталей, обеспечивающих выполнение технических требований на изготовление данного изделия при минимальных затратах рабочей силы, времени и вспомогательных материалов. Перед сборкой сборщик визуально проверяет соответствие деталей требованиям чертежа и технологического процесса. Соприкасаемые поверхности и прилегающие к ним зоны собираемых деталей шириной не менее 20 мм должны быть тщательно очищены от ржавчины, масла, грязи, окалины и влаги во избежание появления пор и других дефектов в металле шва.

Несмотря на то, что в последние десятилетия повышение производительности труда в цехах сварочного производства происходило в основном в результате механизации и автоматизации в больших масштабах собственно сварочных процессов, а также внедрения механизмов, устанавливающих сварные конструкции в положение, наиболее удобное для ручной, автоматической и полуавтоматической сварки. Уровень механизации труда сборщиков сварных конструкций, по данным НИИПТ-маша, составляет 1—4 %, что явно недостаточно. Такой низкий уровень механизированного труда сборщиков сварных конструкций объясняется недостаточным вниманием к этому вопросу со стороны исследовательских и проектно-конструкторских организаций. Такое положение с механизацией сборочных работ сказывается на общей производительности изготовления сварных конструкций, так как время сборки сварных конструкций составляет примерно 40 % общей трудоемкости сборочно-

сварочных и завершающих операций и от качества сборки деталей под сварку зависит качество изготовления сварных конструкций в целом.

При сборке сварных конструкций обеспечивается такое взаимное расположение деталей собираемого сварного узла, в котором они должны находиться в готовом узле. Порядок сборки, устанавливаемый технологом-сварщиком, указывается в картах технологического процесса. Зазоры при сборке должны строго соответствовать чертежу. Превышение кромки одного из элементов стыкового соединения над другим, если оно не предусмотрено и не оговорено специально в чертеже, допускается по всей длине шва не более 0,2 толщины элемента (до 4 мм) и 0,15 толщины элемента (свыше 4 мм, но не более 1,5 мм). Местные превышения кромок определяют по наименьшей толщине свариваемых деталей. Превышение кромок контролируется до сварки.

При сборке сварных конструкций детали между собой соединяют посредством прихваток, которые размещают в местах расположения будущих сварных швов. Прихватки выполняются покрытыми электродами, в защитных газах или под флюсом. Площадь сечения прихваток не должна превышать $\frac{2}{3}$ площади сечения будущего шва и составлять не более 25—30 мм². Длина каждой прихватки должна быть равна 4—5 толщинам соединяемых деталей, но не менее 30 мм и не более 100 мм. Чем меньше толщина свариваемых деталей, тем меньше расстояние между прихватками. В решетчатых конструкциях каждый элемент прихватывают с двух сторон швами длиной 30—40 мм катетом не более 5 мм.

Разрешается наложение прихваток вне мест расположения швов для временного скрепления детали. Эти прихватки после выполнения своего назначения удаляют, а места их размещения зачищают. Рациональна замена прихваток сплошным швом небольшого сечения (технологический шов). Это значительно повышает стойкость металла рабочего шва против кристаллизационных трещин и предотвращает нарушения взаиморасположения деталей в процессе сварки из-за растрескивания прихваток. Сборочные прихватки выполняют сварочными материалами тех же марок, что и при сварке данной конструкции. Требования к качеству прихваток установлены те же, что и к сварочным швам. Прихватки и технологические швы перевариваются в процессе сварки основного шва.

Для крепления деталей перед сваркой и в процесс ее применяют также гребенки (см. рис. 83), удаляемые по мере образования шва. В зависимости от типа производства, особенностей конструкции и технологических условий сборку можно выполнять различными способами: по разметке, по шаблонам или первому изделию, по сборочным отверстиям, в приспособлениях (универсальных, специализированных и специальных), сборку по разметке ведут без приспособлений. Расположение деталей определяют разметкой по чертежу, затем их скрепляют прихватками, съемными фиксаторами и т. п. Производительность способа низкая, его применяют преимущественно в одиночном производстве. Использование шаблонов или первого изделия для сборки позволяет повысить производительность труда.

Наибольшую точность сборки при минимальной трудоемкости можно обеспечить при использовании сборочного оборудования. Основным назначением сборочного оборудования является фиксация и закрепление свариваемых деталей. Это оборудование разделяют на сборочное и сборочно-сварочное. На сборочном оборудовании операция сборки заканчивается прихваткой, на сборочно-сварочном кроме сборки производится полная или частичная сварка изделия. Выбор оборудования определяется технологическим процессом и зависит прежде всего от формы, размеров и требуемой точности собираемых изделий, типа производства, вида сварки и других факторов. При изготовлении сварных конструкций на сборочно-сварочном оборудовании изделие не подвергается переустановке и промежуточной транспортировке. Качество изделий в этом случае выше, чем при сборке на прихватках. В то же время сборочно-сварочное оборудование значительно сложнее и дороже сборочного. Сборочное оборудование может быть универсальным и специальным. Универсальное оборудование предназначено для широкой номенклатуры изделий, его применяют в одиночном и мелкосерийном производствах; специальное оборудование — для одного или нескольких однотипных изделий, оно обеспечивает высокую производительность и высокое качество изготовления. Специальное оборудование целесообразно применять при серийном производстве.

Для примера рассмотрим особенности укрупненной технологии изготовления коробчатой балки экскаватора ЭКГ-4,6Б из стали марки 14Х2ГМР взамен 10ХСНД.

Балка представляет собой сварную конструкцию коробчатого сечения размером 180×500 мм (рис. 173, а) при толщине боковых листов 30 мм, верхнего и нижнего поясов 40 мм, длине балки 7000 мм. Замена стали потребовала и определенных изменений в конструкции сварных соединений с учетом особенностей этой стали. В вертикальных стенках и поясах, соединяемых замковыми соединениями со скосом двух кромок (рис. 173, б), возникают условия для появления непроваренных участков, в которых кон-

центрируются напряжения, способствующие образованию трещин в корне шва как в процессе изготовления, так и при эксплуатации, поэтому для балок из стали 14Х2ГМР была рекомендована конструкция соединения, показанная на рис. 173, в. Кромки под сварку подвергали механической строжке, притупление в корне разделки не превышало 1 мм, а зазоры после сборки балки — 2—3 мм. Несоблюдение этих условий приводило к не-

проварам в корне шва. Прихватки и корневые швы выполняли полуавтоматической сваркой в углекислом газе проволокой Св-08Г2С с равномерным и полным проваром корня шва. При этом осуществляется предварительный и сопутствующий подогрев кромок до $120—150^\circ\text{C}$. Высота сечения корневого шва составляла 6—8 мм. Высокая пластичность металла в корне шва и предварительный подогрев обеспечили стойкость сварных соединений против образований трещин. Соединения сваривались автоматической сваркой под флюсом АН-17 м проволокой Св-10ХГСН2МЮ с предварительным и сопутствующим подогревом до 150°C .

Для того, чтобы обеспечить сварку балки с кантовкой на 180° , не прекращая нагрева, была применена специальная установка (рис. 174). Установка состоит из кантователя для поворота свариваемой балки и газовых трубча-

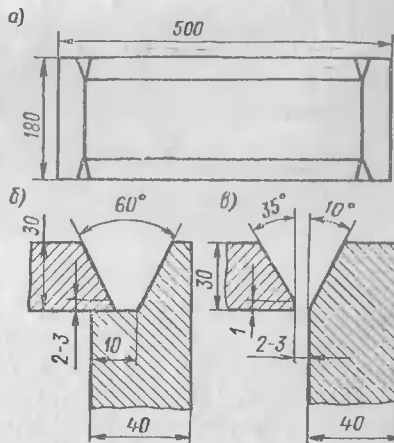


Рис. 173. Вид сечения балки (а) и сварных соединений из сталей 10ХСНД (б) и 14Х2ГМР (в)

тых горелок. Кантователь представляет собой роликовую опору 5, на которой размещаются разъемные кольца 6, служащие для размещения свариваемой балки 7. Роликовая опора имеет приводные ролики 14 с рифленой поверхностью, соединенные между собой валом 8, и не приводные ролики 15, поддерживающие кольца. Кантователь имеет ручной привод 1, вращение от ручки 16 пере-

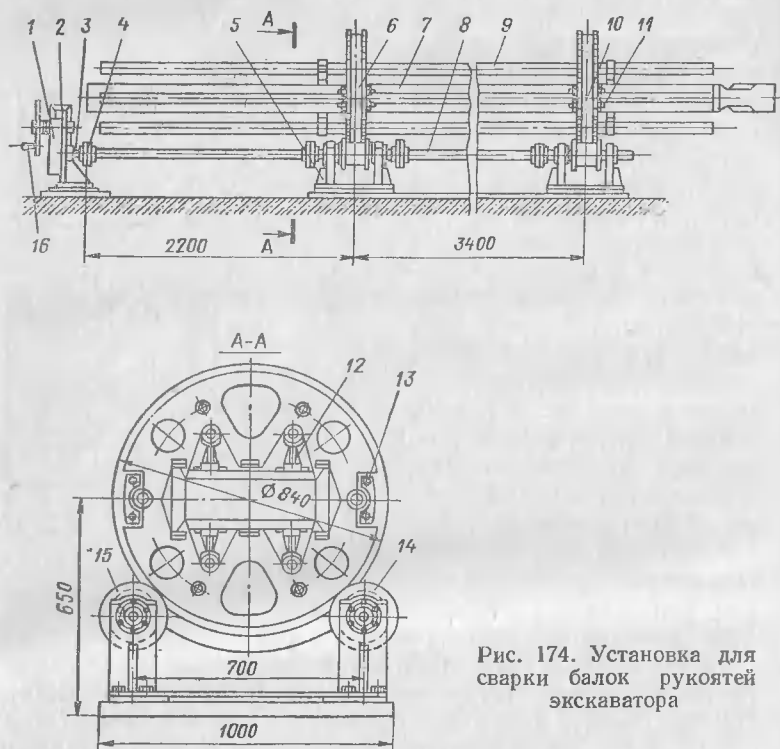


Рис. 174. Установка для сварки балок рукоятей экскаватора

дается через зубчатую передачу 2 валу 3, соединенному муфтой 4 с валом 8. Фиксация нужного положения балки для сварки достигается прикрепленной к стойке привода откидной защелкой, входящей между зубьями верхней шестерни привода. Газовая горелка 9 изготовлена из трубы, равной длине обогреваемой балки. В стенках просверлен ряд отверстий по всей длине трубы для выхода горючего газа.

На балке устанавливают четыре одновременно работающие горелки — две сверху и две снизу. Работа ведется в следующей последовательности. На роликовые опоры укладывают половины колец, затем в их вырезы размещают две горелки и стойки 12, назначение которых поддерживать горелки, когда они окажутся в верхнем положении. Газовые горелки соединяют с питающим их коллектором гибкими шлангами, длина которых позволяет кантовать балку в нужное положение, не прекращая подогрева.

Далее на полукольцах размещают подлежащую сварке балку и на нее ставят стойки 12 (см. рис. 174) с верхними горелками, зажигают горелки и нагревают балку до 120—150 °С и, не прекращая нагрева, выполняют первый проход швов полуавтоматической сваркой в углекислом газе сварочной проволокой Св-08Г2С. Для выполнения первых проходов и швов на противоположной стороне балки перед поворотом ее на 180° устанавливают сверху вторые половины колец. Для этого верхнюю и нижнюю половину колец соединяют между собой планками 13, фиксируют штырями 11 и закрепляют клиньями 10, после чего балка легко поворачивается на 180° для сварки швов на противоположной стороне балки. После поворота верхние половины колец снимают, а верхние подогревающие горелки остаются на месте. Установка готова для сварки корневого шва в углекислом газе и основного шва автоматической сваркой под слоем флюса АН-7М сварочной проволокой Св-10ХГСН2МЮ. Для уменьшения остаточных деформаций от сварки целесообразно после заполнения примерно 60 % площади сечения шва на противоположной стороне произвести кантовку и, соблюдая последовательность всех ранее указанных операций, выполнить такой же объем сварки на корневом шве. Затем произведя кантовки, полностью заполнить шов на противоположной стороне балки и корневые швы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулов А. И., Бельчук Г. А., Демянцевич В. П. Технология и оборудование сварки плавлением. М.: Машиностроение, 1977. 432 с.
2. Багрянский К. В., Доброхина З. А., Хренов К. К. Теория сварочных процессов. Киев: Вища школа, 1976. 423 с.
3. Думов С. И. Лабораторные работы по технологии электрической сварки плавлением. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1982. 151 с.
4. Думов С. И. Технология электрической сварки плавлением. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1978. 368 с.
5. Потаповский А. Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. М.: Машиностроение, 1974. 237 с.
6. Земзин В. Н. Сварные соединения разнородных сталей. М.; Л.: Машгиз 1966. 232 с.
7. Закс И. А. Сварка разнородных сталей. Л.: Машиностроение, 1973. 208 с.
8. Медовар Б. И. Сварка жаропрочных аустенитных сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 1966. 425 с.
9. Ожерблом Н. О. Сварочные деформации и напряжения. М.; Л.: Машгиз, 1950. 140 с.
10. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. М.: Машгиз, 1951. 296 с.
11. Рыжков Н. И. Производство сварных конструкций в тяжелом машиностроении. М.: Машиностроение, 1980. 372 с.
12. Сеферьян Д. Металлургия сварки: Пер. с франц. М.: ГНТИМЛ, 1963. 98 с.
13. Сварка в машиностроении: Справ.: В 4-х т. М.: Машиностроение, 1978. т. 1—2.
14. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением./Под ред. Б. Е. П а т о н а. М.: Машиностроение, 1974. 756 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
Глава I. КЛАССИФИКАЦИЯ ОСНОВНЫХ ВИДОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ . . .	10
§ 1. Классификация электрической дуговой сварки . .	—
§ 2. Сущность основных способов электрической сварки плавлением	15
Глава II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ	24
§ 3 Сварочная дуга и сущность протекающих в ней процессов	—
§ 4. Процессы на отдельных участках сварочной дуги	32
§ 5. Технологические особенности и условия устойчивого горения сварочной дуги	35
§ 6. Действие магнитных полей и ферромагнитных масс на сварочную дугу	41
§ 7. Перенос металла через дугу	46
§ 8 Особенности переноса металла при импульсно-дуговой сварке	48
§ 9. Тепловые процессы при электрической сварке плавлением	51
§ 10. Расчеты тепловых процессов при сварке	61
Глава III. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	75
§ 11. Электродные материалы	—
§ 12. Металлические плавящиеся электроды для ручной дуговой сварки сталей	82
§ 13. Флюсы для дуговой и электрошлаковой сварки	105
§ 14. Газы, применяемые при электрической сварке плавлением	112
§ 15. Условия хранения и транспортировки сварочных материалов	116
	459

Глава IV. МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ И ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКЕ

§ 16. Особенности металлургических процессов при сварке	118
§ 17. Кислород, азот, водород и их влияние на металл шва	123
§ 18. Металлургические процессы при сварке толстопокрытыми электродами	131
§ 19. Металлургические процессы при сварке под флюсом и в защитных газах	139
§ 20. Формирование и кристаллизация металла шва. Микроструктура шва и зоны термического влияния	146
§ 21. Влияние погонной энергии на металл околошовной зоны и металл шва	156
§ 22. Трещины в сварных соединениях сталей	158
§ 23. Старение и коррозия металла сварных соединений	163

Глава V. СВАРОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ

§ 24. Сварочные напряжения, деформации и их классификация	—
§ 25. Схема образования сварочных напряжений и деформаций	174
§ 26. Расчет сварочных остаточных деформаций и механизм возникновения структурных напряжений	180
§ 27. Деформация и напряжения при сварке стыковых и тавровых соединений	184
§ 28. Меры борьбы со сварочными деформациями и напряжениями	192

Глава VI. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

§ 29. Сварные швы и соединения	—
§ 30. Режимы ручной дуговой сварки	209
§ 31. Технология ручной сварки металлическим электродом	212

Глава VII. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ И НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

§ 32. Основные особенности сварки и влияние параметров режима на форму шва	—
§ 33. Технологические способы выполнения сварных соединений	235
§ 34. Расчет режимов автоматической и полуавтоматической сварки под флюсом	243
§ 35. Пути повышения производительности труда при автоматической сварке под флюсом	253
§ 36. Электрошлаковая сварка, ее особенности и область применения	256

§ 37. Режимы электрошлаковой сварки	263
§ 38. Технология электрошлаковой сварки прямолинейных и кольцевых швов	268

Глава VIII. ТЕХНОЛОГИЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ

§ 39. Пост для сварки в углекислом газе и его оснастка	—
§ 40. Режимы и технология сварки в среде углекислого газа	278

Глава IX. ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

§ 41. Группы легированных сталей и влияние примесей	—
§ 42. Технология сварки низколегированных жаропрочных и среднеуглеродистых сталей	290
§ 43. Технология сварки среднелегированных сталей	303
§ 44. Технология сварки высоколегированных сталей и сплавов	310
§ 45. Основные свойства, классификация и способы сварки аустенитных сталей	320
§ 46. Технология сварки разнородных и двухслойных сталей	339

Глава X. НАПЛАВКА ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ И СВАРКА ЧУГУНА

§ 47. Наплавка твердых сплавов	—
§ 48. Механизированные способы наплавки	360
§ 49. Технология сварки чугуна и ее особенности	366

Глава XI. СВАРКА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

§ 50. Сварка алюминия и его сплавов	382
§ 51. Сварка сплавов на магниевой основе	399
§ 52. Сварка титана и его сплавов	401
§ 53. Сварка меди и ее сплавов	417
§ 54. Сварка никеля и его сплавов	426

Глава XII. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЗКА. НОВЫЕ ВИДЫ СВАРКИ МЕТАЛЛОВ

§ 55. Электродуговая и воздушно-дуговая резка металлов	—
§ 56. Дуговая подводная сварка и резка металлов	434
§ 57. Сварка и резка сжатой дугой	439
§ 58. Электронно-лучевая сварка	443
§ 59. Лазерная сварка	446

Глава XIII. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

§ 60. Разработка технологического процесса	—
§ 61. Сборка сварных конструкций	452

Список литературы