

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**А.Г. Багинский, И.А. Хворова,
И.Л. Стрелкова, Н.И. Фомин,
Ю.А. Евтюшкин, К.Г. Герасимович**

ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Часть II

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Третье издание, исправленное и дополненное

Издательство
Томского политехнического университета
2020

УДК 620.22(075.8)

ББК 30.3я73

T384

T384 Технология конструкционных материалов: учебное пособие / А.Г. Багинский, И.А. Хворова, И.Л. Стрелкова, Н.И. Фомин, Ю.А. Евтюшкин, К.Г. Герасимович; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2020. – 105 с.

Учебное пособие включает две части. В первой части рассматриваются основы металлургического производства, литейного производства и обработки металлов давлением. Вторая часть посвящается обработке металлов резанием и сварочному производству.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению 15.03.01 Машиностроение.

УДК 620.18:669

ББК 34.62

Рецензенты

К.т.н., научный сотрудник ЛФМ и НМК ИФПМ СО РАН

А.И. Гордиенко

Генеральный директор группы компаний «МИОН»

С.В. Волков

© ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», 2020

© Багинский А.Г., Хворова И.А., Стрелкова И.Л., Фомин Н.И., Евтюшкин Ю.А., Герасимович К.Г., 2020

© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2020

4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Сваркой называется технологический процесс получения неразъёмных соединений из металлов, сплавов и других однородных материалов в результате образования атомно-молекулярных связей между частицами (атомами) соединяемых заготовок.

Процесс сварки является одним из наиболее совершенных, экономически выгодных, высокопроизводительных и в значительной степени механизированных технологических процессов. Поэтому сварку широко применяют практически во всех отраслях машиностроения и строительной промышленности.

Сварка является основным технологическим процессом в судостроении при изготовлении цельносварных корпусов судов. Сварка незаменима при строительстве нефте- и газопроводов, резервуаров для хранения жидкости и газов, домен, мостов и других инженерных конструкций. В станкостроении сварка применяется для изготовления ответственных узлов станков (элементов станин, коробок скоростей, крупногабаритных шпинделей, масляных баков), в сельхозмашиностроении и автомобилестроении – для получения цельносварных агрегатов, кузовов, топливных баков и многих других машин и металлоконструкций.

Особенно экономически выгодно применение сварки при изготовлении новых изделий с заменой крупногабаритных цельнолитых и кованных узлов машин на комбинированные лито-сварные, ковано-сварные и прокатно-сварные. Такая замена выгодна, если конструкция имеет сложную геометрическую форму и большую массу.

4.1. Физические основы процесса сварки

Металлы и сплавы в твёрдом состоянии являются кристаллическими телами. Идеализированная схема отдельного кристалла представляет собой кристаллическую решётку кубического или более сложного типа. В узлах решётки расположены положительно заряженные ионизированные атомы металла, а валентные электроны обобществлены в объёме всего кристалла.

Ионы в узлах решётки колеблются около нейтрального положения, причем амплитуда их колебаний увеличивается с повышением температуры. Расстояние между атомами в кристалле определяется силами межатомного взаимодействия (рис. 4.1). Силы отталкивания возникают между положительными зарядами ядер атомов и между отрицательными зарядами их электронных оболочек. Силы притяжения обусловлены взаимодействием между ионами, составляющими решётку, и подвижными коллективизированными электронами. Для конкретного металла d_0 – расстояние между атомами, при котором силы отталкивания и притяжения уравновешены, – является параметром кристаллической решетки.

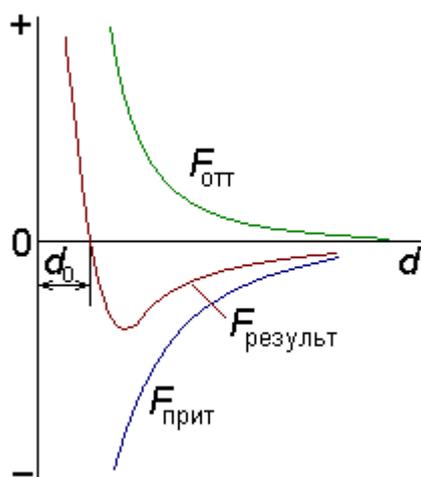


Рис. 4.1. Изменение силы межатомного взаимодействия в зависимости от расстояния

ные поверхности, то они будут соприкасаться только в отдельных точках (рис. 4.2), прочного соединения не образуется.

Кроме того, на процесс сварки сильно влияют поверхностные загрязнения металлов — оксиды, жировые плёнки, а также слои адсорбированных молекул газов, образующиеся на свежезачищенной поверхности металла при взаимодействии с атмосферой почти мгновенно. Хотя давление и сближает тела, но прочного соединения не возникает.

На практике существует несколько десятков способов сварки, однако по характеру формирования соединения они могут быть получены следующими путями: 1) сваркой плавлением, 2) сваркой давлением (например, холодная сварка пластичных металлов) и 3) сваркой с применением нагрева и давления (например, электроконтактная или кузнечная сварка).

4.2. Электродуговая сварка

Сущность процесса заключается в том, что источником тепла при этом виде сварки является электрическая дуга.

Различают следующие схемы дуговой сварки.

1) **Сварка неплавящимся электродом** (угольным или вольфрамовым) 1 дугой прямого действия 2 (рис. 4.3, а). Соединение выполняется путём расплавления только основного металла 3 либо с применением присадочной проволоки 4.

2) **Сварка плавящимся электродом** (металлическим) 1 дугой прямого действия 2 (рис. 5.3, б). Одновременно расплавляется основной металл 3 и

Для большинства металлов параметр кристаллической решётки составляет $3 \cdot 10^{-10} - 5 \cdot 10^{-10}$ м (0,3–0,5 нм). Таким образом, чтобы получить прочное сварное соединение, необходимо сблизить поверхностные атомы двух тел на расстояние 0,3–0,5 нм.

Современные методы обработки поверхности металлов, включая полировку, могут обеспечить отклонение неровностей поверхности $10^{-6} - 10^{-7}$ м. Если соединить две полирован-



Рис. 4.2. Схема соприкосновения двух металлических поверхностей

электрод 1, который пополняет сварочную ванну жидким металлом.

3) *Сварка косвенной дугой 5* (рис. 4.3, в), горящей между двумя неплавящимися электродами 1 (в настоящее время способ почти не применяется).

4) *Сварка трёхфазной дугой 6* (рис. 4.3, г), при которой дуга горит между электродами 1, а также между каждым электродом и основным металлом 3.

При применении постоянного тока различают сварку на *прямой полярности* (электрод подключён к отрицательному полюсу) и сварку на *обратной полярности* (электрод подключен к положительному полюсу источника сварочного тока).

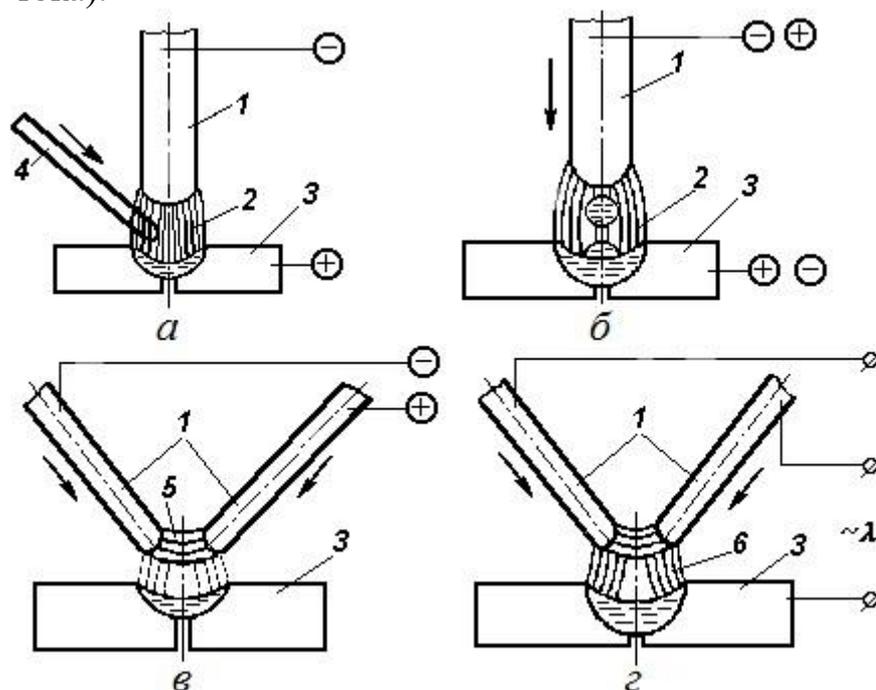


Рис. 4.3. Схемы электродуговой сварки

4.2.1. Понятие об электрической сварочной дуге

Сварочная дуга – мощный стабильный разряд электричества в ионизированной атмосфере газов и паров металла. Ионизация дугового промежутка происходит во время зажигания дуги и непрерывно поддерживается в процессе её горения. Процесс зажигания дуги включает три этапа: короткое замыкание электрода на заготовку, отвод электрода на расстояние 3–6 мм и возникновение устойчивого дугового разряда. Короткое замыкание (рис. 4.4, а) выполняется для разогрева торца электрода 1 и заготовки 2. При отводе электрода (рис. 4.4, б) с его разогретого торца (катода) под действием электрического поля начинается эмиссия электронов 3. Столкновение быстро движущихся по направлению к аноду электронов с молекулами газов и паров металла приводит к их ионизации 4. В результате дугового промежутка становится электропроводным и возникает устойчивая сварочная дуга б (рис. 4.4, в).

Электрическая дуга является мощным источником тепла. Температура в столбе дуги достигает 6000 °С, температура катодного пятна 5 – 2400 °С, анодного пятна 7 – 2600 °С.

Полная тепловая мощность дуги (в Дж/с):

$$Q = K \cdot I_{\text{св}} \cdot U_{\text{д}}$$

где K для постоянного тока равен единице, для переменного тока – 0,7–0,9; $I_{\text{св}}$ – сварочный ток, А; $U_{\text{д}}$ – напряжение дуги, В.

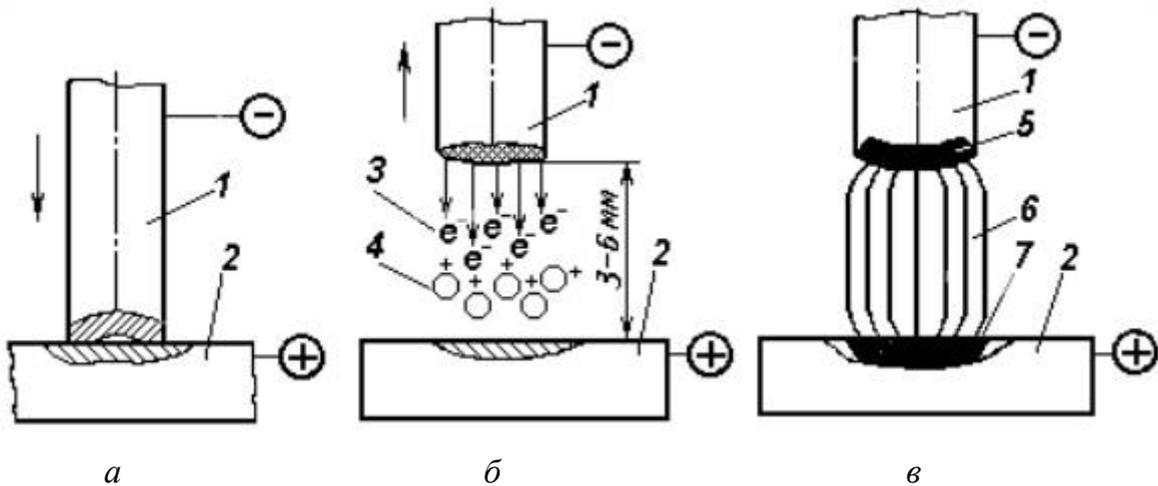


Рис. 4.4. Процесс зажигания дуги

Однако не вся мощность дуги полностью расходуется на нагрев и расплавление электрода и свариваемого металла, часть её излучается в окружающую среду. КПД дуги для автоматической сварки под флюсом составляет 0,9; для электрошлаковой $K = 0,7$; для ручной дуговой $K = 0,8$; для сварки в защитных газах $K = 0,6$.

Электрические свойства дуги описываются *статической вольтамперной характеристикой*, представляющей зависимость между напряжением и током дуги в состоянии устойчивого горения (рис. 4.5).

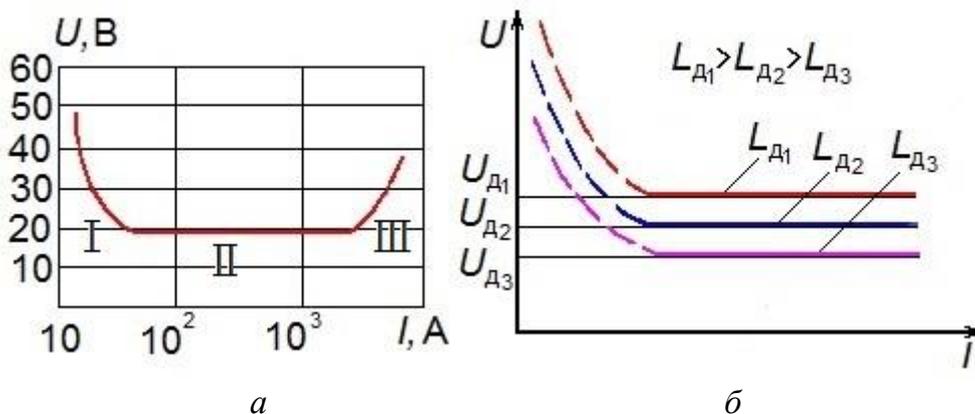


Рис. 4.5. Статическая характеристика дуги (а) и зависимость напряжения дуги $U_{\text{д}}$ от её длины $L_{\text{д}}$ (б)

Характеристика состоит из трёх участков. На участке I характеристика падающая, на участке II – жёсткая; на участке III – возрастающая.

Самое широкое применение имеет дуга с *жёсткой* характеристикой, когда напряжение практически не зависит от тока: при ручной дуговой сварке, автоматической под флюсом, в среде защитных газов неплавящимся электродом.

Дугу с *возрастающей* характеристикой используют при сварке в защитных газах плавящимся электродом, а также при автоматической сварке под флюсом при повышенных плотностях тока.

Дуга с *падающей* характеристикой малоустойчива, имеет ограниченное применение (при сварке тонколистовых сталей с использованием осциллятора). Каждому участку характеристики дуги соответствует определённый характер переноса расплавленного электродного металла в сварочную ванну: I и II – крупнокапельный, III – мелкокапельный или струйный.

У дуги с жёсткой характеристикой напряжение U_d пропорционально её длине L_d :

$$U_d = \alpha + \beta \cdot L_d,$$

где α и β – опытные коэффициенты (для стальных электродов $\alpha = 10$ В, $\beta = 2$ В/мм). Из приведённой зависимости следует, что для сохранения напряжения дуги неизменной длину дуги нужно поддерживать постоянной (рис. 4.5, б).

4.2.2. Источники сварочного тока

Обычные осветительные и силовые источники тока не годятся для сварки. Для питания сварочной дуги требуются источники со специальной внешней характеристикой. Внешней характеристикой источника называется зависимость напряжения на его выходных клеммах от тока в электрической цепи. Внешние характеристики могут быть следующих видов: падающая 1, пологопадающая 2, жёсткая 3 и возрастающая 4 (рис. 4.6).

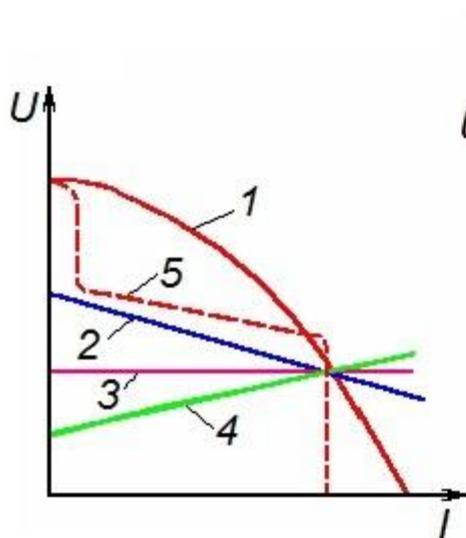


Рис. 4.6. Внешние характеристики источников сварочного тока

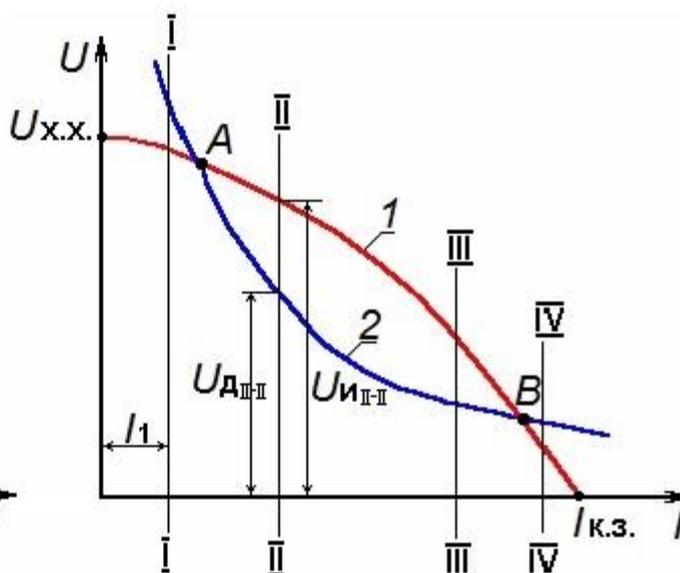


Рис. 4.7. Соотношение характеристики дуги и падающей характеристики источника тока

Оптимальным, с точки зрения требований сварки, будет источник тока с *идеализированной* внешней характеристикой 5. Источник тока выбирается в зависимости от вольт-амперной характеристики дуги, соответствующей принятому способу сварки.

Рассмотрим условия зажигания дуги и её стабильного горения. Для этого наложим на внешнюю характеристику источника тока статическую вольт-амперную характеристику дуги (рис. 4.7).

Здесь $U_{х.х.}$ – напряжение холостого хода (первичная цепь сварочного трансформатора замкнута, вторичная разомкнута, дуга не горит);

$I_{к.з.}$ – ток короткого замыкания при зажигании дуги;

A – точка зажигания дуги, B – точка стабильного горения дуги;

1 – внешняя характеристика источника тока, 2 – статическая характеристика дуги.

Пусть при зажигании дуги в точке A под воздействием внешних факторов (квалификация сварщика, колебания в электросети, изменение степени ионизации и т. д.) ток уменьшится и примет значение I_1 . В этом случае напряжение, выдаваемое источником на дугу, будет меньше, чем требуется дуге в соответствии с её характеристикой, и дуга погаснет.

В случае параметров II-II при зажигании дуги напряжение, выдаваемое источником тока $U_{и-II}$, будет больше, чем требуется дуге ($U_{д-II}$), – дуга будет разгораться и её параметры придут к точке B – точке стабильного горения дуги. При подобном рассмотрении условий горения дуги в точке B мы получаем, что в любом случае (III-III и IV-IV) отклонения параметров дуги от точки B они автоматически будут восстанавливаться, приводя в точку B – точку стабильного горения дуги. Отсюда видно, что зажечь дугу труднее, чем поддерживать горение зажжённой дуги.

Таким образом, основные требования, предъявляемые к сварочному источнику тока, можно сформулировать так:

1. Быть безопасным для сварщика.
2. Обеспечивать стабильное горение дуги.
3. Источник питания должен быть рассчитан на работу в режиме короткого замыкания и иметь устройство для регулирования тока дуги.

Для питания сварочной дуги применяют источники переменного тока (сварочные трансформаторы) и источники постоянного тока (сварочные генераторы и сварочные выпрямители).

Сварочные трансформаторы

Сварочные трансформаторы более распространены, чем источники постоянного тока, так как обладают рядом преимуществ. Сварочные трансформаторы проще в эксплуатации, значительно долговечнее и дешевле.

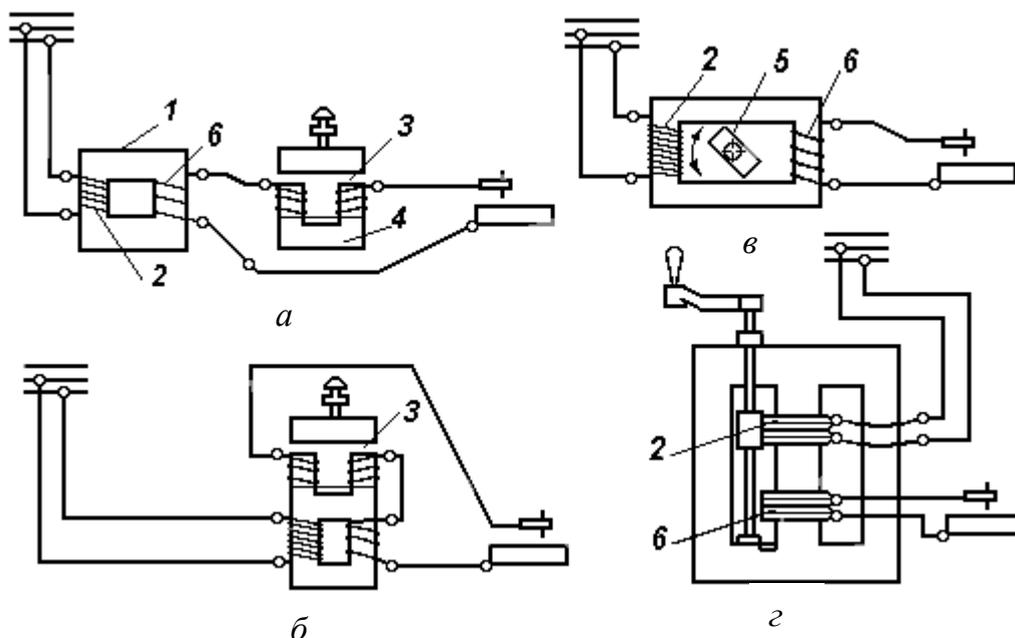


Рис. 4.8. Схемы сварочных трансформаторов:

1 – магнитопровод; 2 – первичная обмотка; 3 – зазор, 4 – дроссель,
5 – подвижный шунт, 6 – вторичная обмотка

Сварочные трансформаторы, как правило, имеют падающую характеристику и используются для ручной дуговой сварки и автоматической сварки под флюсом. Трансформаторы с жёсткой характеристикой применяют для электрошлаковой сварки.

Сварочные трансформаторы могут быть выполнены по электросхеме с **нормальным магнитным рассеянием** и по электросхеме с **повышенным магнитным рассеянием**. К первой схеме относятся трансформаторы с *отдельным дросселем 4* (рис. 4.8, а) и с *совмещённым дросселем* (рис. 4.8, б). По второй схеме выполнены трансформаторы с *подвижным магнитным шунтом* (рис. 4.8, в) и с *подвижной обмоткой* (рис. 4.8, г).

Сварочный трансформатор снижает напряжение сети до напряжения холостого хода (60–80 В), а *дроссель*, обладающий повышенным индуктивным сопротивлением, служит для получения падающей внешней характеристики. Дроссель также служит для плавного регулирования сварочного тока путем изменения воздушного зазора 3. Так, например, с увеличением зазора индуктивное сопротивление дросселя уменьшается, а сварочный ток увеличивается.

Сварочные генераторы

Отечественной промышленностью производится сварочные генераторы с падающей и жёсткой внешней характеристикой, а также универсальные сварочные генераторы, позволяющие получать и падающую, и жёсткую внешнюю характеристику. Сварочные генераторы в настоящее время используются, главным образом, в агрегатах для сварки в полевых условиях,

где привод их осуществляется от двигателя внутреннего сгорания. Во всех остальных областях применения сварки на постоянном токе они вытесняются сварочными выпрямителями.

Следует отметить, что постоянный ток предпочтителен в технологическом отношении: при его применении повышается устойчивость горения дуги. При сварке на переменном токе (от сварочного трансформатора) дуга горит неустойчиво, так как через каждые 0,01 с напряжение и ток дуги проходят через нулевые значения, что приводит к временной деионизации дугового промежутка.

Сварочные выпрямители

Это устройства для преобразования переменного тока в постоянный. Перед генераторами выпрямители имеют ряд преимуществ:

1. Бесшумность и надёжность в работе.
2. Просты в изготовлении и в обслуживании.
3. Более высокий КПД.
4. Имеют значительно меньшую массу.

К недостаткам выпрямителей следует отнести их большую чувствительность к колебаниям напряжения в сети. Для устранения этого недостатка применяют стабилизаторы.

Сварочный выпрямитель состоит из двух основных частей:

1. Понижающий трансформатор с регулирующим силу тока устройством, с падающей или жёсткой характеристикой.
2. Блок выпрямителей, состоящий из набора полупроводников (селеновых или кремниевых).

Селеновые выпрямители менее чувствительны к перегрузкам, возникающим при коротких замыканиях в процессе сварки.

Устройства для повышения устойчивости горения дуги

1. *Осцилляторы* – это устройства, преобразующие ток промышленной частоты низкого напряжения в ток высокой частоты (150–500 кГц) и высокого напряжения (2000–6000 В).

Повышенное напряжение пробивает газовый промежуток без соприкосновения электрода с изделием, ионизирует этот воздушный зазор и обеспечивает стабильное горение сварочной дуги переменного тока.

Высокая частота устраняет физиологическое воздействие тока на организм сварщика, так как ток при частоте 50 кГц вследствие поверхностного эффекта проходит по тонкому наружному слою кожных покровов человеческого тела, не задевая нервных окончаний.

Осциллятор подключается параллельно с дугой.

Он используется для сварки сталей малых толщин, при сварке алюминия и его сплавов.

2. *Импульсные стабилизаторы* обеспечивают подачу синхронизиро-

ванных импульсов повышенного напряжения в момент перехода кривой силы тока через нуль. Применяются импульсные генераторы при сварке алюминия и его сплавов в аргоне неплавящимся электродом и для сварки под флюсом.

4.3. Ручная дуговая сварка

Ручной дуговой сваркой изготавливается более 60 % сварных конструкций. Для получения качественного сварного соединения производят подготовку свариваемых заготовок под сварку. Очищают свариваемые кромки от ржавчины, окалины, масла, влаги, наличие которых приводит к образованию пор, включений и других дефектов.

При сборке заготовок под сварку необходимо обеспечить требуемую точность пригонки и закрепление с помощью прихваток или механических прижимов. Точность сборки контролируется специальным мерительным инструментом (рис. 4.9).

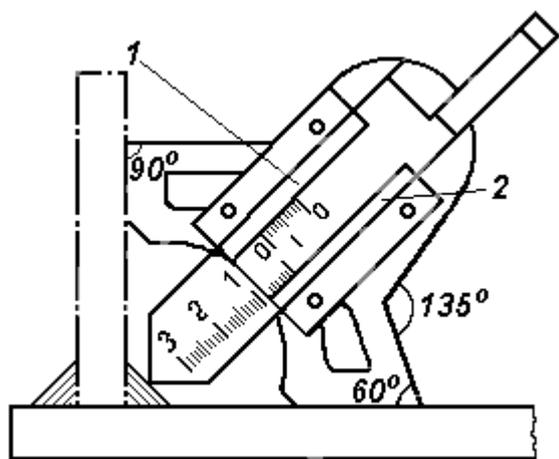


Рис. 4.9. Универсальный измеритель швов: 1, 2 – мерительные линейки

Сварочный пост (рис. 4.10) включает источник тока 1 с кабелями, сварочный стол 2 с вытяжной верхней вентиляцией 3 и нижней вентиляцией 4 в виде щелей в столе (применяется при сварке в защитных газах, которые тяжелее воздуха), электрододержатель 5.

Для ручной дуговой сварки применяются источники как переменного тока, так и постоянного тока: сварочные трансформаторы типа СТЭ, сварочные генераторы типа ПСО, ПС (ПС-300, ПСО-500), сварочные выпрямители типа ВСС, ВКС и инверторы.

Ручную дуговую сварку выполняют штучными электродами с покрытием (рис. 5.11). Электрод состоит из сварочной проволоки 2 и покрытия 3. Дуга 4 плавит проволоку, капли расплавленного металла 5 смешиваются в сварочной ванне 6 с расплавленным металлом заготовок 1. Покрытие тоже плавится, образуя большое количество защитного газа 9 и капли шлака 7, из которых формируется слой жидкого шлака 8 на поверхности металла. Металл кристаллизуется, образуя шов 10, на поверхности которого застывает шлаковая корка 11.

4.3.1. Сварочная проволока

Из сварочной проволоки изготавливают стержни плавящихся электродов с покрытием. При сварке под флюсом и в среде защитных газов сварочная проволока используется в качестве плавящегося электрода без покрытия.

Согласно ГОСТ 2246-70, стальная сварочная проволока выпускается диаметром 0,2; 0,3; 0,5; 0,8; 1; 1,2; 1,4; 1,6; 2; 2,5; 3, 4, 5, 6, 8, 10 и 12 мм.

ГОСТ предусматривает выпуск проволоки из сталей 77 марок. Сварочная проволока подразделяется на 3 группы:

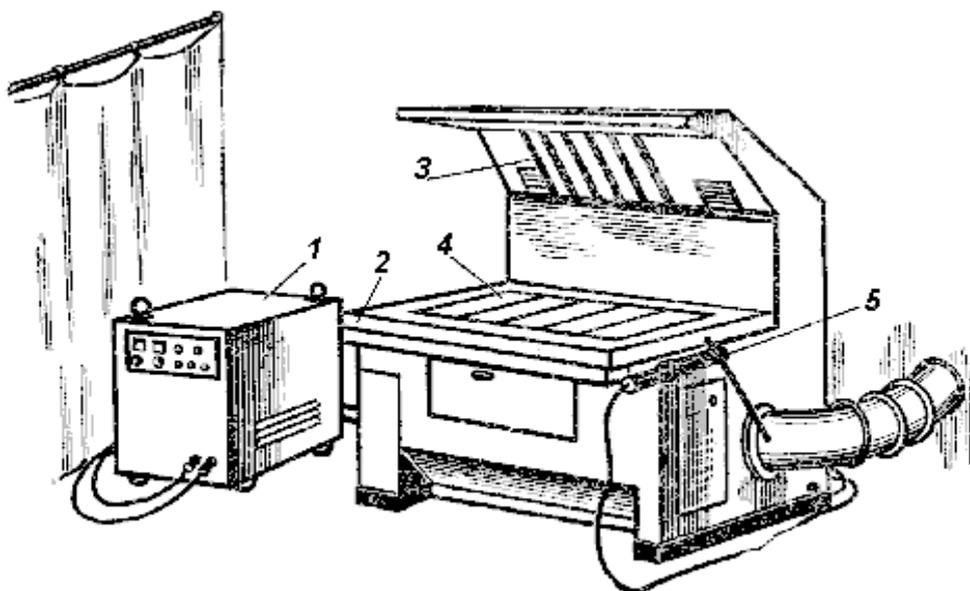


Рис. 4.10. Общий вид стационарного поста для ручной дуговой сварки

- а) **низкоуглеродистая** (марки Св-08, Св-08А, Св-08ГА, Св-10Г2 и др.);
- б) **легированная** (марки Св-08ГС, Св-08Г2С, Св-08ХГС и др.);
- в) **высоколегированная** (марки Св-06Х14, Св-12Х13, Св-06Х18Н9Т и др. для сварки специальных высоколегированных сталей).

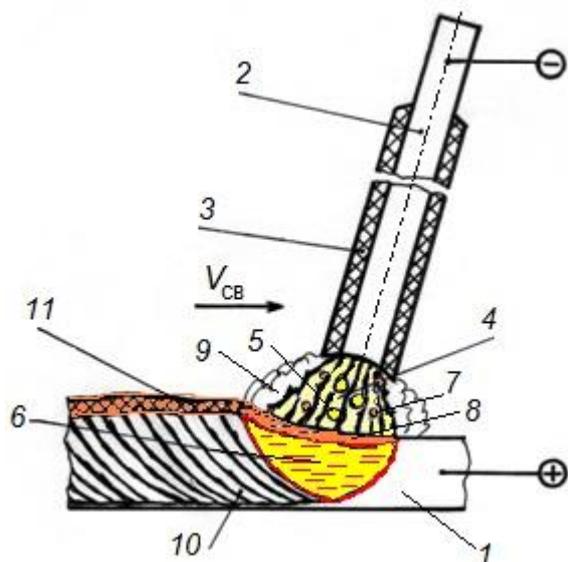


Рис. 4.11. Схема процесса ручной дуговой сварки

Буквы в марках сталей означают легирующий элемент: Б – ниобий, В – вольфрам, Г – марганец, Д – медь, М – молибден, Н – никель, С – кремний, Т – титан, Ф – ванадий, Х – хром, Ю – алюминий. Цифры после букв Св (сварочная) указывают содержание углерода в сотых долях процента. Цифры после букв указывают содержание данного элемента в процентах. Если после буквы цифры нет, то содержание элемента меньше 1%. Буква А в конце марки указывает, что сталь высококачественная, т. е. со сверхнизким содержанием вредных примесей (серы и фосфора).

4.3.2. Классификация электродов

Покрытие предназначено для повышения устойчивости горения дуги, образования газовой и шлаковой защиты жидкого металла сварочной ванны от вредного влияния воздуха, легирования, раскисления и рафинирования металла шва.

В состав покрытий входят следующие материалы (компоненты):

1. **Газообразующие**. Это либо органические вещества (крахмал, декстрин, пищевая мука, целлюлоза), либо неорганические – обычно карбонаты (мрамор CaCO_3 , магнезит MgCO_3 , мел CaCO_3 и др.).

Органические вещества при нагреве выделяют CO_2 ; H_2 ; CO .

Неорганические – газ и шлак: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$.

2. **Легировующие** элементы – Cr, Mo, Ni, Mn, Si и др. – используются в виде сплавов этих элементов с Fe, так называемых ферросплавов.

3. **Ионизирующие** или **стабилизирующие** компоненты, содержащие элементы с низким потенциалом ионизации, – это соединения, в состав которых входят K, Na, Ca.

4. **Раскислители** нужны для удаления кислорода из шва. Для этой цели вводят элементы, обладающие большим сродством к кислороду: Mn, Si, Ti, Al.

Раскисление кремнием: $2\text{FeO} + \text{Si} \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{Fe}$.

5. **Шлакообразующие** – составляют основу покрытия. Обычно это руды (марганцевая MnO, титановая TiO_2) и минералы (ильменит и рутил с содержанием TiO_2 до 30–45 %, полевой шпат, кремнезём, мрамор CaCO_3 , плавленый шпат CaF_2 , гранит).

Состав шлаков – это окислы: CaO, MgO, MnO, FeO, Al_2O_3 , TiO_2 , SiO_2 .

При изготовлении электродов для сварки алюминия и его сплавов ввиду его большого сродства к кислороду применять покрытия из окислов нельзя. В этих случаях покрытия состоят из бескислородных соединений: хлоридов и фторидов (KCl, NaCl, KF и т. п.), которые наносят на стержни многократным окунанием в водные растворы указанных компонентов.

6. **Связующие** – водные растворы силикатов натрия и калия, называемые натриевым и калиевым жидким стеклом, а также натриево-калиевым жидким стеклом.

Na и K играют одновременно роль ионизирующих элементов.

7. **Формовочные добавки** – вещества, придающие обмазочной массе лучшие пластические свойства (бентонит, каолин, декстрин, слюда).

8. Для повышения производительности сварки в покрытие может вводиться дополнительно до 60 % **железного порошка**.

9. **Рафинирующие** компоненты необходимы для удаления вредных примесей S и P.

Серу удаляют с помощью Mn, а фосфор – с помощью CaO.

Некоторые элементы одновременно выполняют несколько функций,

например, мрамор обеспечивает и газовую, и шлаковую защиту:



Классификация электродов по видам покрытий облегчает выбор марки электродов. Дело в том, что в мире существуют тысячи марок электродов и все они могут быть отнесены только к четырём разновидностям в зависимости от *вида покрытия*. Состав, свойства и применение электродов любой марки определяется видом покрытия. Три покрытия являются кислыми: 1) рудно-кислое, 2) рутиловое и 3) целлюлозное – они состоят из кислых окислов. Четвёртое покрытие состоит из основных окислов.

1. **Рудно-кислое покрытие**, условное обозначение «А».

Главную часть покрытия составляют руды (MnO , SiO_2 , Fe_2O_3 и др.). Защита жидкого металла сварочной ванны от вредного влияния воздуха состоит из кислых шлаков.

Металл шва имеет повышенное содержание кислорода, и по этой причине электроды не боятся загрязнений на свариваемых поверхностях. Типичные представители – электроды марок ОММ-5 и ЦМ-7. В настоящее время вместо электродов ОММ-5 выпускаются менее токсичные электроды марки ОЗС-4, а вместо ЦМ-7 – электроды ОЗС-6.

Все электродные покрытия имеют, кроме шлаковой, еще и газовую защиту. Газовая защита создается добавками в покрытие органических веществ или мела CaCO_3 .

Любые марки электродов с рудно-кислым покрытием имеют низкую стоимость, так как состоят из дешёвых и недефицитных компонентов.

Недостаток этого покрытия – склонность к образованию горячих трещин, токсичность из-за марганца и выделение большого количества пыли при сварке. Эти покрытия обладают самыми низкими гигиеническими свойствами. Поэтому их можно применять только при сварке на открытом воздухе или с хорошей вентиляцией помещения. Электроды применяются для сварки углеродистых сталей на постоянном и на переменном токе.

2. **Рутиловое покрытие** на основе минерала рутила TiO_2 , условное обозначение «Р».

Типичный представитель – электроды марки МР-3. Однако рутил дорогой и дефицитный минерал. В последнее время изготавливаются электроды марки АНО-6 и др. на основе ильменита (в нем меньше TiO_2). Достоинство рутиловых электродов: самая высокая технологичность. Это значит, что они обеспечивают самую высокую производительность при сварке и красивый шов. Нетоксичны. Применяются для сварки углеродистых сталей на постоянном и переменном токе.

3. **Основное покрытие**, условное обозначение «Б».

Состоит из мрамора CaCO_3 и плавикового шпата CaF_2 . Главная защита – газовая. Во время сварки при разложении CaCO_3 выделяется много газов CO и CO_2 . Шлаковая защита состоит из CaF и CaO . Кислых окислов нет.

Типичный представитель – электроды марки УОНИ-13. Недостаток электродов с этим покрытием – высокая чувствительность к загрязнениям на свариваемых поверхностях. Требуется тщательной зачистки свариваемых кромок. Кроме того, сварка возможна только на постоянном токе.

Достоинства – незаменимы при сварке всех легированных сталей. Применяются для сварки особо ответственных конструкций.

4. *Целлюлозное покрытие*, условное обозначение «Ц».

Построено на органической основе. Выделяет много защитного газа, поэтому хорошо обеспечивает потолочную сварку. Типичный представитель – электроды марки ОМА-2. Применяются в основном для сварки тонколистовых сталей на постоянном и переменном токе.

Электроды с таким покрытием имеют ограниченное применение из-за появления сварки в углекислом газе.

По механическим свойствам электроды разделяются на три *группы по назначению*:

1. Электроды *для сварки углеродистых конструкционных сталей* Э34, Э42, Э42А, Э46, Э46А и т. д., где “Э” – электрод, а число – прочность наплавленного металла в кгс/мм².

2. Электроды *для сварки теплоустойчивых сталей*: ЭМ, ЭХМ и др.

3. Электроды *для сварки высоколегированных сталей* ЭА-3М6 (аустенитного типа), ЭФ-13 (ферритного типа), ЭН-50Х11-55, ЭНГ-62 (электроды для наплавки, где «Н» – наплавочный, число в конце марки – твердость по Роквеллу *HRC*).

4.3.3. Технология и техника ручной дуговой сварки

Технология сварки отражается в технологической карте и представляет собой описание последовательно выполняемых операций сварки узлов конструкции. Технологическая карта включает данные о свойствах свариваемого металла, вид оборудования, сварочные материалы, режим сварки, технику сварки, контроль качества.

Режим ручной дуговой сварки включает следующие параметры.

К основным параметрам режима сварки относятся диаметр электрода и сила тока. Эти параметры должны быть заданы сварщику. *Диаметр электрода* выбирается в зависимости от толщины свариваемых листов по формуле:

$$d = S/2 + 1 \text{ (мм)}$$

или по таблицам из справочника:

Толщина свариваемых листов, мм	1–2	3	4–5	> 6
Диаметр электрода, мм	1,5–2,5	3	3–4	4–6

Сварочный ток определяется по диаметру электрода по формуле:

$$I = K \cdot d,$$

где K – коэффициент, для малоуглеродистой стали $K = 40–50$, для высоколегированной стали $K = 25–40$, или выбирается по таблицам:

Диаметр электрода, мм	3	4	5
Сила тока, А	110–120	150–160	150–200

Кроме основных параметров режима, существуют дополнительные параметры, которые сварщик выбирает сам. Это длина дуги L и скорость сварки $V_{св}$. Длина дуги определяется по формуле:

$$L = d/2 + 1 \text{ (мм)},$$

где d – диаметр электрода.

Увеличение длины дуги приводит к увеличению напряжения, при этом увеличивается ширина шва и уменьшается глубина проплавления.

При увеличении скорости сварки уменьшается глубина проплавления.

$$\text{Скорость сварки } V_{св} = \alpha_n \cdot I_{св} / (3600 \cdot \gamma \cdot F_n),$$

где α_n – коэффициент наплавки, г/А·час, определяется количеством наплавленного металла G_n за час при силе тока в 1 ампер: $\alpha_n = G_n / (I \cdot t)$;

γ – плотность наплавленного металла, г/см³;

F_n – площадь поперечного сечения шва, см².

Техника сварки включает движения электрода (1 – в зону сварки, 2 – вдоль шва, 3 – колебания поперёк шва) и наклон электрода α (рис. 4.12, а).

Изменяя наклон электрода, сварщик может регулировать глубину проплавления металла, способствовать лучшему формированию валика шва и влиять на скорость охлаждения ванны.

Узкий валик накладывается без поперечных колебаний электрода при проваре корня шва и сварке тонколистовых сталей. Во всех других случаях применяют валики, уширенные с помощью поперечных колебаний электрода (точки 1–2–3, рис. 4.12, б).

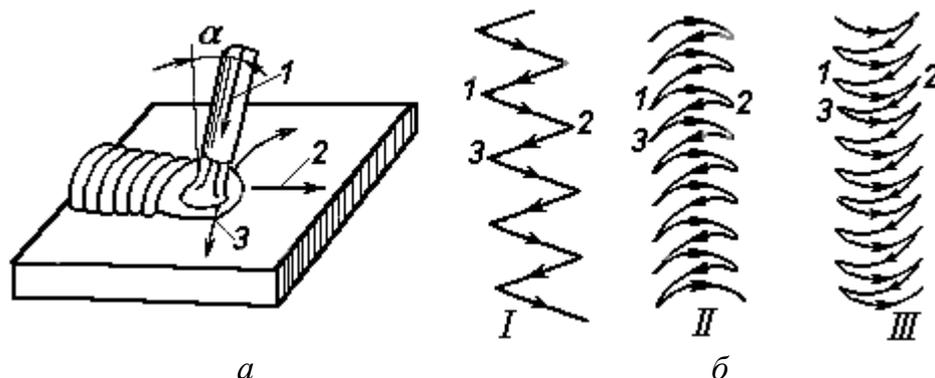


Рис. 4.12. Схема движений электрода

В точках 1, 2, 3 скорость перемещения электрода уменьшается, что

способствует прогреванию кромок.

Преимущества:

1. Универсальность способа, т. е. можно сваривать все металлы, любые конструкции во всех пространственных положениях.
2. Большая оперативность способа позволяет производить сварку во многих ситуациях (при авариях, при ремонте в полевых условиях и т. п.).
3. Простота процесса и оборудования.
4. Возможность получения высококачественных соединений.

Недостатки:

1. Качество шва зависит главным образом от квалификации сварщика.
2. Тяжёлые условия выполнения сварки (в условиях сквозняков из-за сильной вентиляции или под открытым небом в зимних условиях).
3. Низкая производительность.

Применение:

1. Ручной дуговой сваркой выполняется более 50 % всех сварных конструкций (по весу).
2. Способ применяется во всех отраслях промышленности (в разных отраслях машиностроения, при прокладке газо- и нефтепроводов, в гражданском и промышленном строительстве и т. д.).
3. Ручной дуговой сваркой сваривают все малоуглеродистые и низколегированные стали. При сварке сталей с повышенным содержанием углерода или легирующих элементов требуется зачастую предварительный, сопутствующий и последующий подогрев для предотвращения закалочных трещин.

4.4. Автоматическая дуговая сварка под флюсом

При *автоматической дуговой сварке под флюсом* все сварочные операции вместо сварщика выполняет автомат: зажигание дуги и поддержку её стабильного горения, защиту сварочной ванны от вредного влияния воздуха, подачу сварочной проволоки и флюса в зону сварки, передвижение дуги вдоль шва, заварку кратера по окончании сварки.

Схема процесса автоматической сварки под флюсом приведена на рис. 4.13.

Электродная проволока 3 из кассеты специальным механизмом с роликами 2 подаётся в зону сварки со скоростью плавления. Дуга 10 горит между концом электрода и изделием 8 под слоем флюса 5, который подаётся из бункера. Под действием тепла дуги флюс плавится. В результате над сварочной ванной 9 образуется слой жидкого шлака 4, под защитой которого горит дуга. По мере перемещения дуги в направлении сварки образуется сварной шов 7, покрытый шлаковой коркой 6. Остатки нерасплавившегося флюса пневматическим устройством отсасываются, подаются обратно в бункер для флюса и снова используются. Сварочный источник питания подключают к

изделию и токоподводящему контакту 1, по которому скользит электродная проволока.

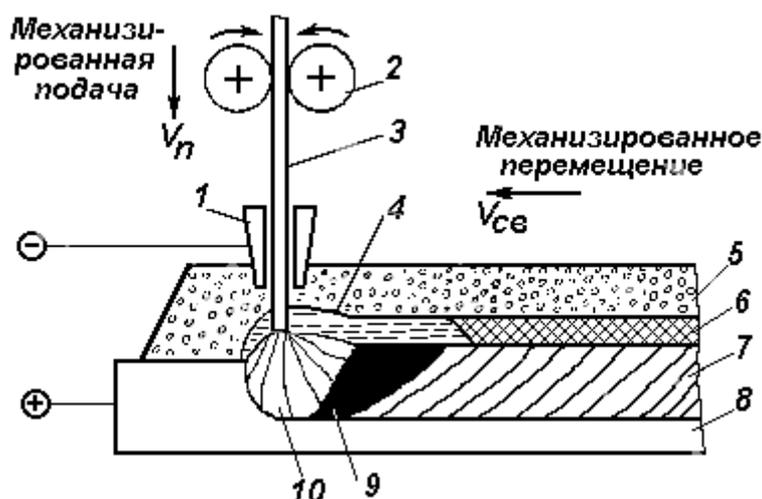


Рис. 4.13.Схема процесса автоматической дуговой сварки под флюсом

Флюс выполняет те же функции, что и электродное покрытие при ручной сварке, обеспечивая стабилизацию дуги, защиту металла, раскисление и легирование ванны.

Автоматическую сварку выполняют либо самоходными сварочными автоматами (тракторами), либо неподвижными сварочными головками, под которыми перемещается изделие.

Сварку сталей под флюсом ведут с использованием электродной проволоки диаметром 1–6 мм при силе тока 150–2000 А. Напряжение на дуге 22–55 В. Скорость сварки 30–50 м/час, но иногда может достигать и 120 м/час.

Сварочный флюс представляет собой сыпучий неметаллический материал, полученный плавлением или грануляцией. По способу изготовления различают плавленые и неплавленые (керамические, полученные методом грануляции) флюсы.

Плавленые флюсы приготавливают плавлением в электропечах из исходных компонентов: марганцевая руда (MnO), кварцевый песок (SiO₂) и плавиковый шпат (CaF₂). Примером таких флюсов могут служить кислые флюсы ОСЦ-45 и АН-348. Эти флюсы применяются для сварки низкоуглеродистых и малолегированных сталей. Для сварки высоколегированных сталей применяются флюсы типа АН-20 и АН-26 на основе CaO, CaF₂, Al₂O₃.

Неплавленые (керамические) флюсы изготавливаются из тех же компонентов, что и электродное покрытие. В отличие от плавленных, они обладают высокой металлургической активностью, но имеют низкую прочность при транспортировке и боятся влаги (гигроскопичны).

Для автоматической сварки применяют два вида автоматов, отличающихся принципом регулирования режима горения дуги:

1) автоматы *с постоянной скоростью подачи проволоки* используют процесс саморегулирования длины и напряжения дуги (типа ТС-17Р, ТС-ПМ-У, УТ-1250-3);

2) автоматы *с регулируемой скоростью подачи проволоки* во время сварки, скорость зависит от изменений напряжения дуги (АДС-1000-2).

Для полуавтоматической сварки предназначены полуавтоматы типа ПШ-54-У и др.

Преимущества:

1. Автоматическая сварка под флюсом производительнее ручной в 10 и более раз за счёт применения больших сварочных токов (до 2000 А) и непрерывности процесса сварки.

2. Данный способ обеспечивает более эффективное использование тепла дуги: КПД достигает 90 %, а при ручной дуговой сварке составляет порядка 40 %.

3. Большие токи и отсутствие разбрызгивания металла позволяют сваривать заготовки большой толщины (до 20 мм за один проход без разделки кромок).

Недостатки:

1. Автоматическая сварка возможна только в нижнем положении.

2. Ограничено применение сварки: только для прямолинейных швов и швов небольшой кривизны.

3. При сварке под флюсом невозможно наблюдать за процессом и контролировать его.

Применение

Под флюсом сваривают все низкоуглеродистые стали (Ст1, Ст2, Ст3, 10, 15, 25), низколегированные и высоколегированные стали, медь, титан и их сплавы, алюминиевые сплавы типа АМгб.

Автоматическую сварку под флюсом применяют в серийном и массовом производстве прямолинейных и кольцевых швов на металле толщиной 2–100 мм. Автоматическую сварку применяют при изготовлении паровых котлов, резервуаров для хранения газов и жидкостей, корпусов судов, доменных печей, мостовых балок, сварных труб и т. п.

4.5. Электрошлаковая сварка

Электрошлаковая сварка представляет собой один из способов сварки плавлением, в котором теплота, необходимая для расплавления основного и электродного металла, выделяется в расплавленном флюсе (шлаковой ванне) при прохождении через него электрического тока. Эту сварку, в отличие от сварки под флюсом, выполняют при вертикальном расположении заготовок (или наклонном расположении под углом до 45° от вертикали) с зазором между ними 20–30 мм и с принудительным формированием сварного шва.

Схема ЭШС показана на рис. 4.14. Источник переменного тока 7 подключен к сварочному электроду 4 и к свариваемым заготовкам 1. Электрод погружен в расплавленный флюс (шлаковую ванну) 3, обладающий электропроводимостью.

Первоначально процесс ЭШС протекает так же, как и при дуговой автоматической сварке под флюсом. Процесс сварки начинается с зажигания мощной электрической дуги (одной или нескольких) под слоем флюса на подкладке. После образования ванны из жидкого шлака, которая является электропроводящей, процесс дуговой сварки переходит в электрошлаковый.

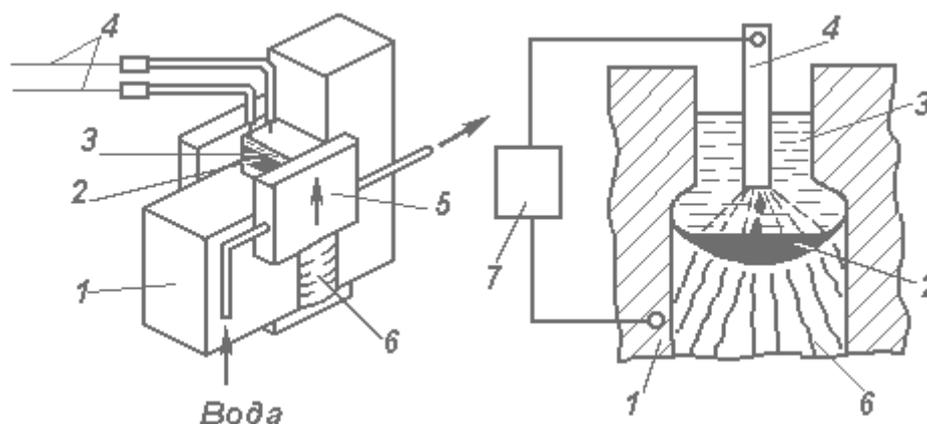


Рис. 4.14. Схема процесса электрошлаковой сварки

Горение дуги прекращается, и плавление электрода происходит за счёт тепла, выделяющегося, на основании закона Джоуля-Ленца, при прохождении электрического тока через жидкий шлак. Образуется сварочная ванна 2. Шлаковая и сварочная ванны удерживаются от вытекания плотно прижатыми, охлаждаемыми водой ползунами 5, которые по мере образования сварного шва 6 перемещаются вверх.

По типу применяемого электрода различают сварку электродной проволокой, пластинчатым электродом и плавящимся мундштуком.

4.5.1. Сварка электродной проволокой

Эта сварка является основным методом ЭШС прямолинейных и круговых швов на металле толщиной до 600 мм. Заготовки толщиной до 150 мм можно сваривать одним электродом, совершающим поперечные колебания для равномерного разогрева шлаковой ванны по всей толщине. Металл толщиной более 150 мм сваривают тремя, а иногда и большим числом проволок.

Для сварки применяют проволоку диаметром 2–3 мм. Сварочный ток составляет 750–1000 А. В качестве источников питания применяют сварочные трансформаторы для ЭШС с жёсткой внешней характеристикой.

4.5.2. Сварка пластинчатым электродом

Этим методом сваривают прямолинейные швы длиной не более 1,5 м.

Толщина пластинчатого электрода составляет 0,8–1,2 мм, а ширина 30–60 мм.

Во время сварки электрод опускается в шлаковую ванну специальным механизмом. Преимуществом этого метода является простота применяемой аппаратуры и повышенная устойчивость процесса сварки. К недостаткам следует отнести необходимость мощных источников питания (сила тока 1500–2000 А).

4.5.3. Сварка плавящимся мундштуком

Этим методом сваривают заготовки большой толщины (более 500 мм) и соединяют детали сложной формы. Плавящийся мундштук представляет собой пластинчатый электрод с формой и размерами свариваемого соединения.

Пластина (плавящийся мундштук) имеет канал для подачи электродной проволоки в зону сварки. Мундштук расплавляется в процессе сварки, а непрерывно подающаяся проволока служит присадочным металлом для образования шва. Особенно целесообразен плавящийся мундштук для сварки криволинейных швов переменного сечения, так как он обеспечивает равномерное распределение присадочного металла по сечению.

4.5.4. Оборудование для электрошлаковой сварки

Для ЭШС применяются автоматы А-820 и А433Р для сварки вертикальных швов. В этом случае подача сварочной проволоки в зону сварки, поддержание нужного режима сварки, вертикальное перемещение ползунов и т. д. выполняется автоматически.

Автомат А535 предназначен для сварки прямолинейных и кольцевых швов стыковых, угловых и тавровых соединений. Сварка ведётся электродной проволокой или пластинами. Для сварки в монтажных условиях и труднодоступных местах применяется полуавтомат А671Р (для заготовок толщиной от 16 до 50 мм, расположенных вертикально или под углом 45°).

Преимущества:

1. ЭШС имеет производительность в 5–15 раз выше по сравнению с автоматической сваркой под флюсом, так как позволяет сваривать за один проход металлы любой толщины с применением в 1,5–2 раза большей величины тока. При этом чем больше толщина свариваемых заготовок, тем выше экономический эффект ЭШС.

2. ЭШС уменьшает расход сварочной проволоки, так как сварка ведётся без разделки свариваемых кромок.

3. Обеспечивается получение металла шва более высокого качества за счет хорошего удаления вредных примесей и газов из металла. Это объясняется значительным временем нахождения металла шва в расплавленном состоянии, а также направлением сварки снизу вверх (при этом все примеси отесняются на поверхность шлаковой ванны) и отсутствием дуги.

Недостатки:

1. Наблюдается перегрев металла шва и околошовной зоны, что приводит к росту зерна; требуется термическая обработка.
2. Плохая сменяемость флюса в процессе сварки; требует периодического отсасывания шлаковой ванны и добавки флюса.

Применение

1. Этим способом можно сваривать за один проход без разделки кромок вертикально или под углом до 45° установленные заготовки толщиной 50–2000 мм из любой стали, меди, алюминия, титана и их сплавов.
2. ЭШС особенно выгодно применять в тяжёлом и транспортном машиностроении для изготовления комбинированных сварно-литых и сварнокованных конструкций: станины и детали сложных прессов, крупных станков, прокатных станов, коленчатых валов судовых двигателей, роторы и валы гидротурбин, элементы котлов высокого давления и т. п.

4.6. Дуговая сварка в защитных газах

Сущность процесса заключается в том, что в зону действия сварочной дуги подается непрерывно с помощью специальной сварочной горелки защитный газ. Эта локальная (местная) защита (рис. 4.15) от вредного воздействия воздуха создается потоком газа 1, который истекает из сопла 2, расположенного концентрически относительно сварочного электрода 3. Дуга горит между электродом и изделием 5, образуя металлическую ванну 4.

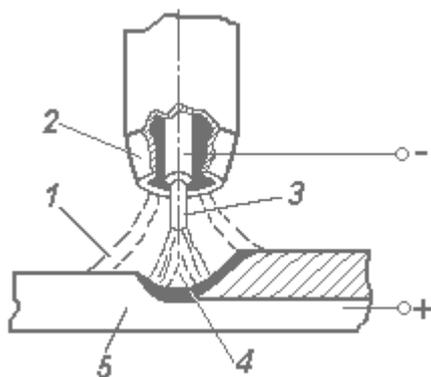


Рис. 4.15. Схема дуговой сварки в атмосфере защитного газа

При этом используют керамическое или медное охлаждаемое водой сопло. Защитной средой служат газы:

- 1) инертные одноатомные – аргон, гелий;
- 2) нейтральные двухатомные – азот, водород;
- 3) активные – углекислый газ.

В связи с тем, что гелий в десять раз легче аргона, расход его при сварке на 30–40 % больше, чем расход аргона, и это свойство ограничивает применение гелия. Сравнительно ограниченное применение находит и атомно-водородная сварка из-за высокого напряжения холостого хода, которое для облегчения зажигания дуги должно составлять 250–300 В. При этом рабочее напряжение 30–120 В, сварочный ток небольшой (10–70 А). Таким образом, существует опасность поражения сварщика током холостого хода высокого напряжения.

Наибольшее применение нашли аргонодуговая сварка и сварка в среде углекислого газа.

4.6.1. Аргонодуговая сварка

Аргонодуговую сварку можно выполнять плавящимися и неплавящимися электродами. По степени автоматизации сварка неплавящимся электродом может быть ручной и автоматической с подачей или без подачи дополнительного присадочного материала, а сварка плавящимся электродом – полуавтоматической или автоматической.

В качестве неплавящегося электрода используют вольфрамовые прутки диаметром 1–8 мм. (Вольфрам имеет температуру плавления 3410 °С.) Большой стойкостью обладают вольфрамовые прутки ВТ15, ВТ20 с добавкой 1,5–2,0 % двуокиси тория. Торий способствует лёгкому зажиганию дуги и её стабильному горению, но обладает некоторой радиоактивностью. В этом отношении предпочтительнее вольфрамовые прутки с добавками около 2 % оксида лантана или оксида иттрия. Расход вольфрамового электрода примерно 0,5 г на 1 м шва при силе тока 300 А.

Защитный газ *аргон* является инертным газом, без цвета, без запаха, тяжелее воздуха (это требует вытяжной нижней вентиляции или специального газоотсоса). Аргон обладает хорошей ионизирующей способностью, поэтому обеспечивает стабильное горение дуги, в том числе и при малых сварочных токах. Он не образует химических соединений и нерастворим в жидких металлах. Аргон получают из воздуха, он может быть двух видов: технический и чистый для сварки. Транспортируется аргон в стандартных стальных баллонах серого цвета с черной надписью «Аргон чистый» под давлением 150 атм (15 МПа). Емкость баллона 40 л. Расход аргона при сварке зависит от диаметра электрода и составляет 120–600 л/час. Баллон вмещает 6000 л аргона. Давление газа на выходе из горелки 30–50 кПа.

Большинство металлов сваривается на постоянном токе прямой полярности. Такое включение («плюс» на изделии) обеспечивает высокую стойкость вольфрамового электрода. Это объясняется тем, что в электрической дуге наибольшее количество теплоты выделяется на аноде (положительный электрод). Поэтому, например, при диаметре электрода 3 мм допускаемая сила тока при прямой полярности 140–280 А, а при обратной полярности – только 20–40 А.

При обратной полярности резко повышается нагрев электродов и их расход. Вместе с тем дуга обратной полярности обладает весьма важным технологическим свойством – удалять с поверхности заготовок оксиды и загрязнения. Особенно важно это свойство при сварке алюминия и его сплавов, на поверхности которых всегда имеется мгновенно образующаяся на воздухе тугоплавкая оксидная плёнка Al_2O_3 . При обратной полярности поверхность металла бомбардируется тяжёлыми положительно заряженными ионами аргона, которые разрушают оксидные пленки на металле. Этот процесс называется катодным распылением.

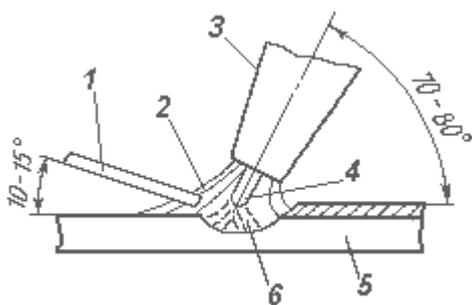


Рис. 4.16. Положение горелки и присадочного прутка при ручной аргонодуговой сварке неплавящимся электродом

Однако, поскольку при постоянном токе обратной полярности стойкость электродов низка, для сварки алюминия, магния и бериллия используют переменный ток. Удаление оксидов происходит в те полупериоды, когда изделие является катодом. Допускаемый переменный ток выше, чем при постоянном токе обратной полярности, и составляет для диаметра электрода 3 мм 100–160 А, что позволяет в определённой степени использовать положительные свойства дуги прямой и обратной полярности.

Ручную сварку вольфрамовым электродом выполняют наклонной горелкой, рис. 4.16. Угол наклона горелки 3 к поверхности свариваемого металла 5 составляет 70–80°, а присадочная проволока 1 подается под углом 10–15°. Дуга 6 горит между электродом 4 и изделием под защитой струи газа 2.

Существуют следующие разновидности аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом: сварка погружённой дугой для увеличения глубины проплавления, сварка с применением флюса, повышающего сосредоточенность теплового потока в пятне нагрева, импульсно-дуговая сварка пульсирующей дугой.

При импульсной дуге шов получается расплавлением отдельных участков с определённым перекрытием. Импульсы дуги чередуются с паузами, во время которых продолжает гореть маломощная дежурная дуга, что обеспечивает надёжное горение дуги во время импульса. Регулирование длительности импульсов и пауз позволяет в широких пределах изменять характер кристаллизации шва и влиять на свойства сварных соединений. При сварке тонколистовых материалов особенно заметны преимущества импульсной сварки: улучшается форма шва, снижается остаточная деформация изделия, уменьшается вероятность прожогов.

Аргонодуговую сварку плавящимся электродом применяют для соединения деталей из цветных металлов и легированных сталей. Сварка происходит с капельным или струйным переносом металла электрода в сварочную ванну. Характер переноса металла зависит от плотности тока. При сварке сталей струйный перенос начинается при плотности тока более 60–120 А/мм², при сварке алюминия – при 70 А/мм².

Сварку плавящимся электродом в аргоне выполняют на автоматах и полуавтоматах с постоянной скоростью подачи проволоки. Применяют источники питания постоянного тока с жёсткой или возрастающей внешней характеристикой (преобразователи типа ПСГ-500, выпрямители ВС-300, ВДГ-301 и др.) и обратную полярность. При такой характеристике источника

и высокой плотности тока возрастает эффект саморегулирования дуги, что способствует устойчивости процесса.

Полуавтоматическая аргонодуговая сварка

Этот способ совмещает в себе элементы автоматической и ручной сварки. Подача сварочной проволоки из кассеты 6 в горелку 2 по шлангу 3 осуществляется автоматически механизмом подачи 5, а перемещение горелки 2 вдоль кромок заготовок 1 – вручную. В горелку подается также аргон из баллона 4 (рис. 4.17).

В отличие от ручной сварки, полуавтоматический способ позволяет применять более высокие плотности тока и большую скорость подачи сварочной проволоки, что обеспечивает повышенную производительность.

Автоматическая аргонодуговая сварка

В этом случае все операции сварки – зажигание дуги, подача аргона, присадочной и электродной проволоки в зону дуги и перемещение дуги вдоль направления сварки, а также поддержание стабильного горения дуги – осуществляются автоматом, который обслуживает оператор сравнительно невысокой квалификации.

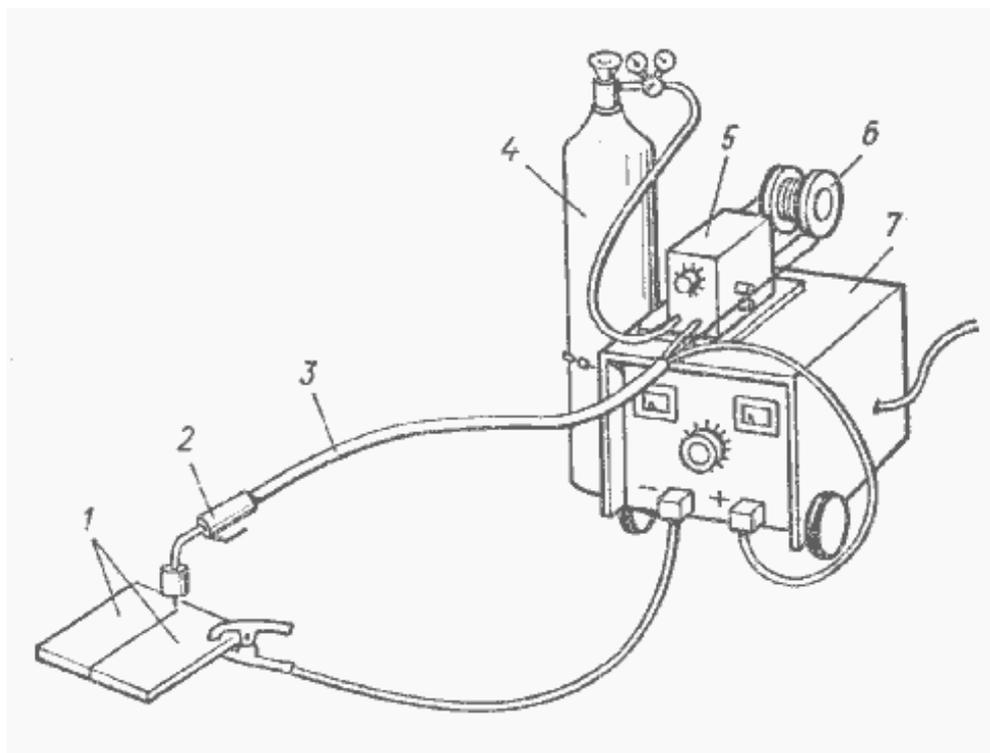


Рис. 4.17. Сварочный пост полуавтоматической дуговой сварки в среде аргона

Этим способом можно выполнять сварку неплавящимся электродом без присадки и плавящимся электродом с присадкой. Источник питания дуги имеет напряжение холостого хода 60–80 В, нормальная дуга горит при

напряжении 10–12 В. Скорости автоматической сварки плавящимся электродом обычно составляют 15–80 м/час. При автоматической сварке применяют плотности тока в 1,3–1,5 раза выше, чем при полуавтоматической сварке.

Автоматическая сварка плавящимся электродом позволяет получать качественные соединения на стали толщиной 0,5 мм и более, полуавтоматическая – на стали толщиной 1,0 мм и более. Автоматической сваркой выполняют непрерывные швы.

Аргонодуговая сварка в камере с контролируемой атмосферой

Сварка производится в герметичной камере, из которой предварительно откачивают атмосферный воздух, а затем заполняют её аргоном. Сварку выполняют вручную вольфрамовым электродом без присадки или с присадкой или с помощью автомата с дистанционным управлением. Этим способом можно сваривать как мелкие, так и крупногабаритные изделия. Для сварки последних применяют камеры объёмом 450–500 м³. Внутри такой камеры успешно можно работать сварщику, снабжённому специальной системой дыхания.

Преимущества:

1. Возможность сварки легкоокисляющихся металлов (Al, Mg и др.).
2. Возможность сварки в любых пространственных положениях.
3. Возможность визуального наблюдения за процессом формирования шва.
4. Высокое качество сварных соединений, отсутствие шлаковых включений.
5. Концентрированный нагрев обеспечивает получение малой зоны термического влияния и меньшую деформацию изделия.

Недостатки:

1. Дорогой и дефицитный аргон.
2. Дорогое оборудование и вольфрамовые электроды.

Применение

1. Аргонодуговая сварка является универсальным способом и позволяет сваривать все металлы и сплавы.
2. Способ почти незаменим при сварке алюминия и его сплавов типа АМц, АМг, АЛ5, АЛ10, магниевых сплавов типа МА8, МА21, меди и её сплавов – латуней и бронз, никеля и его сплавов типа СН1, нихрома, тугоплавких и химически активных металлов – ниобия, тантала, титана, молибдена, циркония.
3. Аргонодуговая сварка неплавящимся электродом является одним из лучших способов сварки тонколистовых (от 0,1 до 1,5–2 мм) заготовок алюминиевых, магниевых сплавов, нержавеющей и жаропрочных сталей.
4. Аргонодуговую сварку применяют при изготовлении ответственных изделий из специальных легированных сталей.

5. Трудно поддаются сварке дуралюмины. В зоне термического влияния резко снижается прочность, пластичность и коррозионная стойкость, а в металле шва часто образуются трещины.

6. Аргонодуговая сварка из-за дороговизны процесса не применяется при изготовлении изделий из обычных углеродистых сталей.

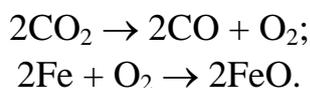
7. В камере с контролируемой атмосферой сваривают в основном изделия из ниобия, тантала, титана, молибдена и особо ответственных изделий из легких сплавов.

4.6.2. Дуговая сварка в среде углекислого газа

Эту сварку выполняют только плавящимся электродом на повышенных плотностях постоянного тока обратной полярности. Оборудование поста для полуавтоматической сварки в углекислом газе состоит из газозащитной горелки, баллона с углекислым газом, газового редуктора для снижения давления газа, сварочного шланга для подачи углекислого газа в горелку, источника питания дуги постоянного тока с внешней возрастающей характеристикой, шкафа управления, механизма подачи сварочной проволоки из кассеты в сварочную горелку. При применении CO_2 газовое оборудование оснащается подогревателем газа и его осушителем. Последние необходимы для предотвращения замерзания редуктора в результате поглощения теплоты при испарении жидкой углекислоты (и превращении её в газ). Расход газа определяется по расходомеру.

Углекислый газ – бесцветный, со слабым запахом, в 1,2 раза тяжелее воздуха. При температуре $-78\text{ }^\circ\text{C}$ или при небольшом давлении переходит в жидкость. Получают CO_2 из отходящих газов химических производств в сжиженном или твёрдом состоянии (сухой лёд). Выпускают два сорта углекислого газа: для сварки с 999,5 % чистого газа и пищевую углекислоту с 98,5 % CO_2 . Поставляют CO_2 в сжиженном состоянии в стандартных стальных баллонах под давлением 60–70 атм (6–7 МПа). Баллоны окрашиваются в чёрный цвет с жёлтой надписью « CO_2 сварочный». В стандартный баллон емкостью 40 л вмещается 25 кг жидкой углекислоты, которая при испарении дает 12000 дм^3 газа. Расход углекислого газа при сварке зависит от диаметра электродной проволоки и составляет 400–1000 $\text{дм}^3/\text{час}$. Подается CO_2 в горелку под давлением 0,4–0,6 атм.

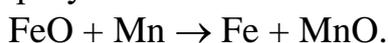
При применении CO_2 в качестве защитного газа необходимо учитывать металлургические особенности процесса сварки, связанные с окислительным действием CO_2 на расплавленный металл. При высоких температурах сварочной дуги CO_2 диссоциирует на окись углерода CO и кислород, который, если не принять специальных мер, приводит к окислению свариваемого металла и легирующих элементов:



СО выделяется в виде пузырьков, ванна начинает «кипеть», при кристаллизации шва образуются поры.

FeO тяжелее стали и хорошо растворяется в жидкой стали, насыщая сварочную ванну кислородом и снижая механические характеристики наплавленного металла. Для нейтрализации окислительного действия СО₂ в сварочную ванну вводят раскислители: марганец и кремний. С этой целью выпускается специальная сварочная проволока с повышенным содержанием марганца и кремния (например, Св-08ГС и Св-08Г2С).

При введении раскислителей в сварочную ванну «кипение» прекращается. Раскислители, обладая большим сродством к кислороду, нежели железо, восстанавливают его, образуя шлак:



Оксид MnO легче жидкой стали, поэтому он всплывает на поверхность ванны, образуя её шлаковую защиту.

Следует помнить, что поры в шве образуются также из-за наличия загрязнений на свариваемых поверхностях (ржавчины, окалины, влаги), и из-за влаги в СО₂.

Таким образом, при сварке в углекислом газе происходит насыщение сварочной ванны кислородом (который легко удаляется с помощью раскислителей). Главная же роль СО₂ как защитного газа заключается в защите сварочной ванны от попадания в нее азота воздуха. Азот, в отличие от СО₂, невозможно удалить из сварочной ванны. Азот образует с железом нитриды, которые приводят к хрупкости сварного шва.

Для полуавтоматической сварки в СО₂ применяют полуавтоматы типа ПДГ-303. Для автоматической сварки в СО₂ используются автоматы тракторного типа АДГ-502 или автомат А-1417. Оба автомата предназначены для выполнения прямолинейных швов значительной протяжённости в нижнем положении.

При сварке в СО₂ дуга имеет возрастающую вольт-амперную характеристику, поэтому она горит более устойчиво и лучше саморегулируется в том случае, если источник питания имеет жёсткую или возрастающую внешнюю характеристику. Для повышения устойчивости дуги и уменьшения разбрызгивания следует применять высокую плотность тока, т. е. применять более тонкую сварочную проволоку. При полуавтоматической сварке используют проволоку диаметром 0,8–2 мм. При автоматической сварке в СО₂ применяется проволока диаметром 1,8–3,5 мм.

Полуавтоматическую сварку ведут «углом вперёд» или «углом назад» (угол наклона горелки от вертикали 5–15°). При сварке «углом вперед» глубина проплавления меньше, валик – шире. Такой метод применяется при сварке тонколистовых сталей.

Преимущества:

Дешёвый защитный газ, высокая производительность, способ малочувствителен к наличию на свариваемых поверхностях окалины и ржавчины.

Недостатки:

Повышенное разбрызгивание требует применения противопожарных покрытий околошовной зоны, способ сварки в CO_2 требует специальной легированной сварочной проволоки и специального источника питания постоянного тока. Нельзя сваривать легкоокисляющиеся цветные металлы и высоколегированные стали.

Применение

Сварка в CO_2 предназначена для соединения обычных углеродистых сталей (Ст1, Ст2, Ст3, 10, 20, 30) и – ограниченно – низколегированных (19Г, 14Г2 и др.). Сварка в CO_2 наиболее эффективна при соединении тонколистовых сталей.

4.7. Газовая сварка

При *газовой сварке* в качестве источника тепла, за счёт которого происходит нагрев и расплавление кромок заготовок, используется пламя, образующееся при сгорании горючего газа в атмосфере кислорода.

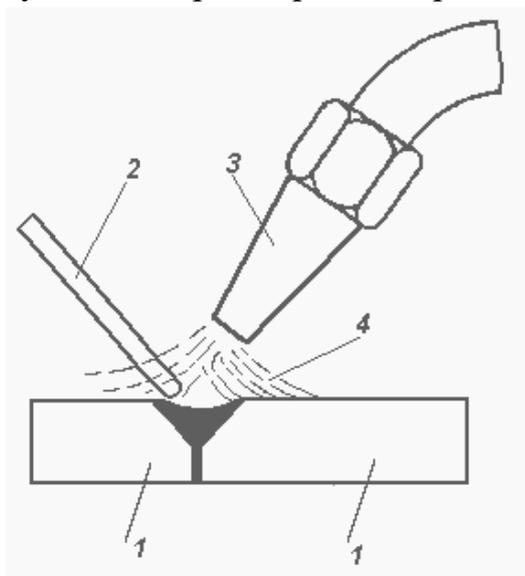


Рис. 4.18. Схема газовой сварки

Сущность процесса газовой сварки заключается в следующем. Заготовки 1 (рис. 4.18) располагаются на столе, армированном шамотной плиткой, при этом с помощью прижимов обеспечивается фиксирование свариваемых кромок. К сварочной горелке 3 подводится с помощью резиновых шлангов ацетилен и кислород от баллонов и зажигается сварочное пламя 4. Одновременно в зону сварки подается присадочный металл 2 (сварочная проволока). По мере перемещения пламени сварочная ванна затвердевает, образуя сварной шов.

4.7.1. Сварочные материалы для газовой сварки

Кислород – газ без цвета и запаха – получают из воздуха путем глубокого охлаждения. При этом кислород переходит в жидкое состояние, а азот испаряется, так как имеет температуру кипения ниже, чем кислород. Транспортируется кислород в стандартных стальных баллонах емкостью 40 дм^3 , под давлением 150 кгс/см^2 (15 МПа), окрашенных в голубой цвет.

Правила Гостехнадзора предусматривают окраску баллонов в условный цвет, присвоенный данному газу: кислород – голубой, ацетилен – белый,

аргон – серый, углекислый газ – чёрный, водород – зелёный, другие газы – красный цвет. На верхней части баллона выбивают паспортные данные баллона: знак завода-изготовителя баллона, номер баллона, вес в кг, емкость в литрах, рабочее испытательное давление в кгс/см², дата изготовления и год следующего испытания, клеймо ОТК завода-изготовителя. На этой части баллона выбивают клеймо при последующих испытаниях, которые проводятся через пять лет.

Для приближённого расчёта количества кислорода в баллоне ёмкость баллона (дм³) умножают на давление газа в нём (кгс/см²).

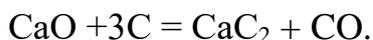
Пример: ёмкость баллона 40 дм³, давление 150 кгс/см³. Количество кислорода в баллоне равно 40·150 = 6000 дм³ (при атмосферном давлении). Зная часовой расход газа при сварке, определяют, на сколько часов работы хватит этого количества газа.

При соприкосновении сжатого газообразного кислорода с плёнкой масел и жиров происходит самовоспламенение масел и взрыв баллона. Поэтому кислородные баллоны следует тщательно предохранять от загрязнений маслом. Особенно опасны пропитанные жидким кислородом вата, уголь, одежда, волосы: насыщенные кислородом, они легко загораются.

Горючие газы. Основным горючим газом при сварке и резке является *ацетилен* (С₂Н₂). Все остальные газы (пропан, природный газ, водород, нефтяные газы, пары бензина или керосина) являются *газами-заменителями*, так как ацетилен даёт самую высокую температуру пламени (3150–3200 °С).

Ацетилен не имеет цвета, но обладает резким неприятным характерным запахом. Чистый ацетилен является взрывоопасным. Смеси ацетилена с воздухом способны взрываться, если содержание ацетилена в смеси с воздухом в пределах 2,2–100 % (по объёму).

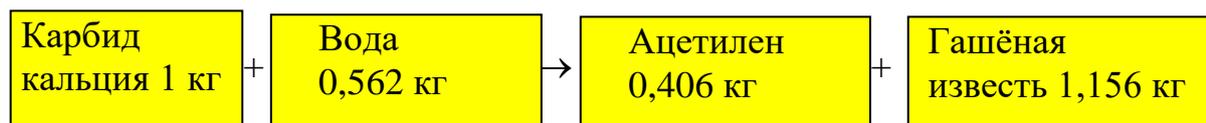
Технический (сварочный) ацетилен получают из карбида кальция путем разложения последнего водой. Карбид кальция получают путем сплавления в дуговых электропечах кокса и обожжённой извести по схеме:



Карбид кальция (CaC₂) представляет кускообразное вещество тёмно-серого или коричневого цвета. При разложении 1 кг карбида водой получается практически от 230 до 280 дм³ ацетилена и известь по схеме:



Количественное соотношение реагентов:



Наполнение, хранение и транспортировка ацетилена в обычных баллонах недопустима из-за возможности взрыва ацетилена, находящегося в баллоне под давлением, или в смеси с воздухом. Поэтому, чтобы обеспечить

безопасность, баллоны заполняют древесным углём (или пемзой, инфузородной землей, другой пористой массой) в количестве 290–320 г на 1 дм³ ёмкости баллона. Массу в баллоне пропитывают ацетоном (225–300 г на 1 дм³ ёмкости баллона). Ацетилен в больших количествах растворяется в ацетоне и становится безопасным.

Сварочная (присадочная) проволока. При газовой сварке применяют проволоку, близкую по химическому составу к свариваемому металлу, т. е. такую же, что и для дуговой сварки. Диаметр проволоки выбирают в зависимости от толщины свариваемого металла. Для сварки меди, латуни, алюминия и его сплавов применяют проволоку из цветного металла соответствующей марки. Чугун и бронзы сваривают при помощи прутков, отлитых из этих металлов. В чугунный пруток желателно добавить кремний.

Флюсы служат для частичной защиты расплавленного металла от окисления кислородом воздуха и, главное, для удаления образующихся окислов.

Составы флюсов выбирают в зависимости от состава и свойств свариваемого металла. Флюс должен плавиться раньше, чем свариваемый металл, и хорошо растекаться по шву. В качестве флюсов используют прокалённую буру, борную кислоту, кремниевую кислоту и ряд других веществ.

При сварке углеродистых сталей флюсы не применяют, так как в данном случае сварочное пламя хорошо защищает металл от окисления. Чугуны, хромистые и хромоникелевые стали, медь и её сплавы, алюминий и его сплавы, магниевые сплавы необходимо сваривать с применением флюсов.

4.7.2. Оборудование для газовой сварки

Ацетиленовые генераторы (газогенераторы) – это аппараты для разложения карбида кальция водой с целью получения газообразного ацетилена (рис. 4.19).

Согласно ГОСТ 5190-67 ацетиленовые генераторы классифицируются следующим образом:

по производительности: 0,5; 0,75; 1,25; 2,5; 3; 5; 10; 20; . . . 320 м³/час ацетилена;

по способу устройства: передвиж-

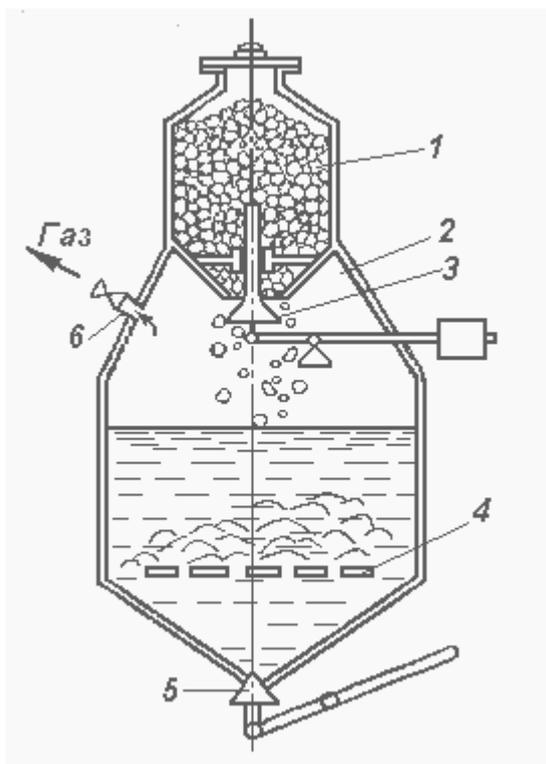


Рис. 4.19. Схема ацетиленового генератора системы “карбид в воду”:

- 1 – бункер, 2 – газобразователь,
- 3 – питатель, 4 – решётка,
- 5 – спуск ила, 6 – отбор газа

ные и стационарные;

в зависимости от системы взаимодействия карбида кальция с водой: «карбид на воду», «вода на карбид», «вытеснения» «комбинированные» (вода на карбид и вытеснение), «сухие»;

в зависимости от давления вырабатываемого ацетилена: низкого давления – до 0,1 кгс/см²; среднего давления – от 0,1 до 1,5 кгс/см².

На пути следования ацетилена от генератора к сварочной горелке устанавливают *водяной затвор* для предотвращения взрыва ацетилена в газогенераторе при обратном ударе пламени. Обратный удар возникает, когда скорость истечения газов становится меньше скорости их горения. Практически это происходит при перегреве горелки и засорении сопла или центрального отверстия инжектора. Для газов-заменителей ацетилена применяются для этой цели обратные клапаны.

Сварочные горелки бывают инжекторными и безинжекторными. Наибольшее применение находят *инжекторные горелки* (рис. 4.20), которые предназначены для сварки чёрных и цветных металлов толщиной от 0,5 до 30 мм. Кислород из баллона подается к вентилю 5 и через него в инжектор 4. Вытекая из инжектора с большой скоростью в смесительную камеру 3, струя кислорода создает разрежение, вызывающее подсос ацетилена. Ацетилен поступает по шлангу через клапан 6 и вентиль 7 в смесительную камеру. Смесь по трубке 2 выходит из сменного наконечника 1 и поджигается.

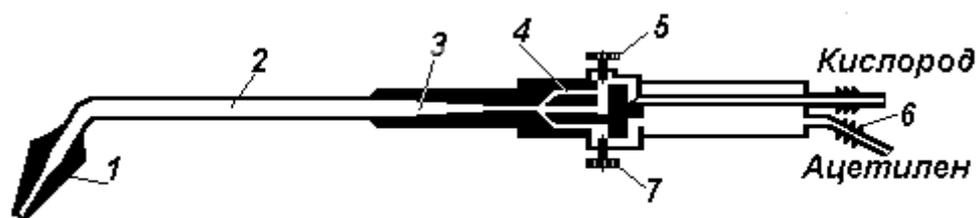


Рис. 4.20. Схема инжекторной горелки

4.7.3. Виды, свойства и регулирование сварочного пламени

Строение, температура и свойства сварочного пламени зависят от соотношения кислорода и ацетилена в горючей смеси. Различают три вида кислородно-ацетиленового пламени:

1) *нейтральное пламя* (его называют также *нормальным* или *восстановительным*). Оно образуется при соотношении $O_2 : C_2H_2 = 1 : 1,2$. Таким пламенем сваривают большинство металлов и сплавов;

2) *науглероживающее пламя* образуется при соотношении $O_2 : C_2H_2 < 1$, т. е. при избытке ацетилена. Такое пламя применяют для сварки чугуна, наплавки быстрорежущей стали и твёрдых сплавов;

3) *окислительное пламя* образуется при соотношении $O_2 : C_2H_2 > 1,2$, т. е. при избытке кислорода. Применяется при сварке латуней.

Строение нормального пламени представлено на рис. 4.21. Газосварочное пламя состоит из трёх зон: ядра, рабочей (сварочной) зоны и факела пламени. *Ядро* – самая яркая часть пламени, состоит из кислорода и раскаленных продуктов разложения ацетилена. *Рабочая (сварочная) зона* имеет синеватое свечение и самую высокую температуру, состоит из продуктов горения ацетилена: H_2 и CO . Этой частью пламени нагревают и плавят металл при сварке. *Факел* пламени состоит из CO_2 , паров воды и кислорода воздуха. Эта часть пламени является окислительной, так как углекислый газ и пары воды при высоких температурах окисляют железо.

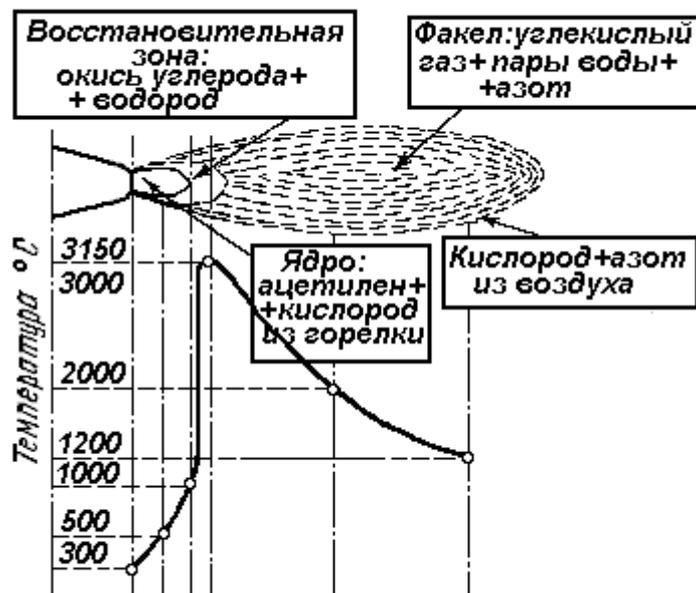


Рис. 4.21. Строение нормального пламени и распределение температур

По мощности пламени определяют номер наконечника сварочной горелки.

Диаметр присадочной проволоки d выбирают в зависимости от толщины S свариваемых листов. При толщине свариваемых листов $S < 10$ мм можно пользоваться формулой:

$$d = 0,5 \cdot S + 1.$$

При толщине $S > 10$ мм диаметр присадочного прутка принимают равным 5 мм.

Существуют два основных *способа газовой сварки*: правый и левый. При толщине металла менее 3 мм применяют *левую сварку*, при которой горелка движется вдоль стыка справа налево. Присадочный пруток находится слева от горелки. При толщине металла больше 5 мм применяют *правую*

4.7.4. Технология газовой сварки

Качественный шов обеспечивается правильным подбором мощности горелки, вида сварочного пламени, способа сварки, угла наклона горелки, применением соответствующего присадочного материала и флюса.

Мощность сварочного пламени оценивают по расходу ацетилена A , который вычисляют по формуле:

$$A = K - S,$$

где S – толщина свариваемых листов, мм;

K – коэффициент; для углеродистой стали и чугуна $K = 100-120$; для нержавеющей стали $K = 70-80$; для меди $K = 160-200$; для алюминия $K = 75$.

По мощности пламени определяют номер наконечника сварочной горелки.

сварку: горелка движется слева направо. Правый способ обеспечивает некоторую термическую обработку выполненного соединения, поэтому его предпочтительно применять для сварки закаливаемых сталей любой толщины.

Угол α наклона горелки к свариваемой поверхности зависит от толщины свариваемого металла.

При увеличении толщины металла нужна большая концентрация тепла и, соответственно, больший угол наклона горелки.

4.7.5. Пост для газовой сварки

Пост для газовой сварки (рис. 4.22) включает: сварочный стол 1, армированный шамотным кирпичом, свариваемые заготовки 2, присадочную сварочную проволоку 3, горелку 4, гибкие сварочные шланги 5, баллон с ацетиленом 6 и редуктором 6 (окрашенным в белый цвет, как и баллон), баллон с кислородом и редуктором 7 (окрашенным в голубой цвет, как и баллон). Каждый редуктор оснащен двумя манометрами: один показывает давление газа в баллоне, другой – давление на выходе (в шланге).

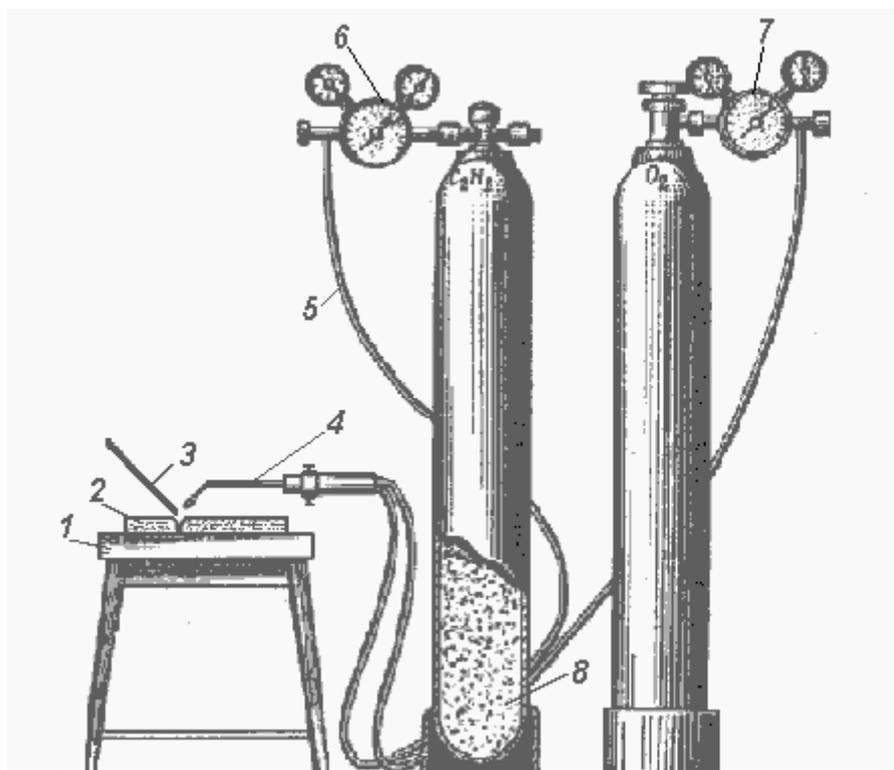


Рис. 4.22. Пост газовой сварки

Преимущества:

1. Способ обладает большой универсальностью, т. е. позволяет сваривать чёрные и цветные металлы и их сплавы.
2. Способ позволяет регулировать температуру в широких пределах.
3. Сварка возможна во всех пространственных положениях.

4. Возможность производить подогрев свариваемых заготовок перед сваркой, в процессе сварки и после сварки.

Недостатки:

1. Большая околошовная зона нагрева и, следовательно, большие деформации и коробления.

2. При увеличении толщины свариваемых листов резко снижается производительность сварки и качество швов.

3. Взрывоопасность применяемых газов.

4. Необходима высокая квалификация сварщика.

Применение

1. Сварка тонких листов (0,2–2 мм).

2. Ремонт различных машин и механизмов, заварка дефектов в отливках, в том числе из чугуна и бронзы, монтаж и ремонт сантехнических и теплотехнических коммуникаций.

3. Наплавка специальных легированных сталей (жаропрочных, износостойких и др.) на конструкционную сталь.

4. Пайка и резка металлов.

4.8. Газовая ацетилено-кислородная резка металлов

Кислородная резка основана на способности некоторых металлов гореть в струе кислорода при температуре ниже температуры плавления, с выделением тепла. Газовой ацетилено-кислородной резкой можно резать только те металлы, которые удовлетворяют следующим условиям:

1. Температура плавления металла должна быть выше температуры сгорания металла в кислороде. Например, железо имеет температуру плавления 1539 °С, а температура воспламенения чистого порошка железа в кислороде 315 °С. Этому условию не удовлетворяет чугун. У него температура плавления ниже температуры сгорания. По этой причине чугун невозможно разрезать кислородной резкой.

2. Температура плавления окислов металла должна быть ниже температуры плавления металла. Например, этому условию не удовлетворяет алюминий и его сплавы: температура плавления алюминия 660 °С, а образующаяся на поверхности алюминия тугоплавкая пленка Al_2O_3 имеет температуру плавления 2050 °С и препятствует резке и сварке.

Схема ацетилено-кислородного резака представлена на рис. 4.23. Конструкция резака такая же, как и газовой горелки, только резак имеет дополнительный канал 4 для подачи режущего кислорода. Мундштук 3 имеет два отверстия: для подачи режущего кислорода 2 и горючей смеси 1 для создания подогревательного пламени.

Шланги применяются с внутренним диаметром 5,5; 9,5 и 13 мм и с наружным диаметром 17,5 или 22 мм. Для горючих газов шланги допускают рабочее давление 3 атм (304 кН/м²), а для кислорода – 10 атм (1013 кН/м²).

Длина шланга при работе от баллона должна быть не менее 8 м, а при работе от генератора – не менее 10 м.

Газы-заменители ацетилена, применяемые при газовой сварке и резке менее эффективны, чем ацетилен.

Нефтяной газ – смесь горючих газов, являющихся побочным продуктом нефтеперерабатывающих заводов.

Природный газ получают из газовых месторождений. Он состоит в основном из метана (93–99 %).

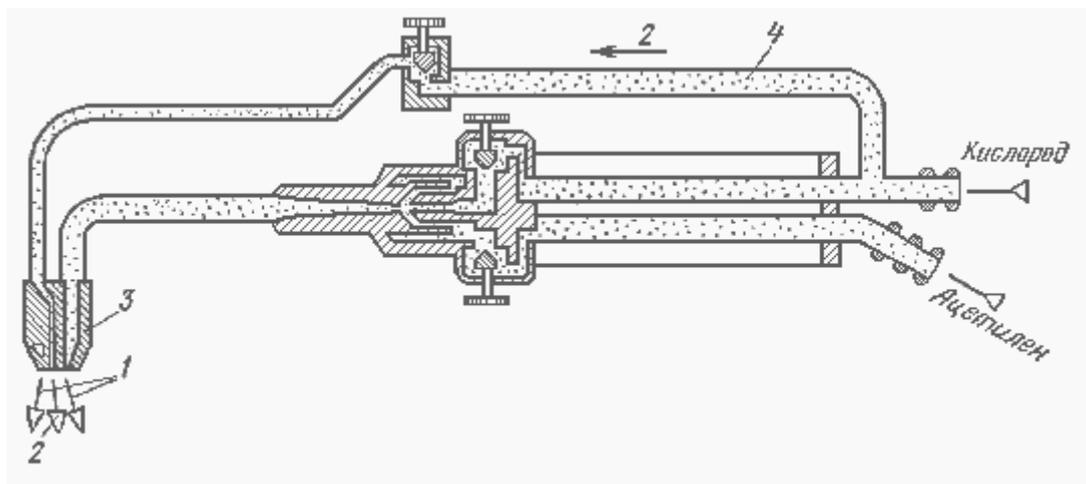


Рис. 4.23. Схема ацетилено-кислородного резака

Пропан-бутановую смесь получают при добыче и переработке нефтяных газов и нефти. Хранится и транспортируется в сжиженном состоянии в баллонах ёмкостью 23,33 и 45 кг под давлением 16–17 атм (1621–1722 кН/м²). Жидкая смесь заполняет только половину баллона, так как при нагреве значительное повышение давления может привести к его взрыву.

Бензин и керосин используют в виде паров. Для этой цели горелки и резаки имеют специальные испарители, которые нагреваются от вспомогательного пламени или электрическим током.

Кислородно-флюсовая резка применяется для резки металлов, которые невозможно разрезать ацетилено-кислородной резкой. При этом способе в зону резки вместе с режущим кислородом вдувается порошкообразный флюс на основе порошка железа и феррофосфора. Для подачи флюса в зону резки резак имеет дополнительную трубку.

При сгорании порошка железа выделяется дополнительное тепло, а главное – флюс образует легкоплавкий жидкотекучий шлак.

Этим способом режут чугун, медь и её сплавы, алюминий и его сплавы, нержавеющие стали.

Резка кислородным копьём выполняется тонкостенной стальной трубкой (копьём), присоединённой к рукоятке. Применяют газовые трубы диаметром ¼ дюйма. Кислород проходит через копьё, прижатое свободным концом к прожигаемому металлу. Начинают резку с подогрева края заготов-

ки электрической дугой или газовым пламенем. При подаче кислорода в копьё его конец загорается и дальнейший подогрев не нужен.

Этот способ применяется для резки скрапа большой толщины (до 1200 мм), «козлов» лётки сталеплавильных печей, железобетонных плит, отверстий в бетоне. Для повышения термохимического эффекта резки копьём в стальную трубку вставляют проволоку из технического титана. Расплавленный титан и его окислы способны растворять любые огнеупоры.

Резка копьём может быть применена для разборки бетонных плит при катастрофах.

Другие способы огневой резки металлов. Дуговая электрическая резка имеет низкую производительность и качество реза. Воздушно-дуговая резка угольным электродом в настоящее время редко применяется. Плазменно-дуговая резка наиболее перспективна, так как обеспечивает чистый рез и высокую производительность.

4.9. Контактная электрическая сварка

Контактная электрическая сварка осуществляется с помощью нагрева и давления. При всех видах контактной сварки металл нагревается за счёт выделения тепла при прохождении электрического тока через сварное соединение; количество этого тепла определяется по закону Джоуля-Ленца:

$$Q = 0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot t,$$

где I – сварочный ток, А; R – сумма сопротивлений свариваемых участков цепи, Ом; t – время протекания тока, с. Существуют несколько разновидностей электроконтактной сварки.

4.9.1. Электроконтактная стыковая сварка

Стыковая сварка (рис. 4.24) подразделяется на сварку сопротивлением и сварку оплавлением.

При *сварке сопротивлением* торцы заготовок 1 тщательно подгоняют, заготовки закрепляют в захватах 2 сварочной машины, сводят до соприкосновения и включают ток от понижающего трансформатора 3. После нагрева металла в месте контакта до пластического состояния давление сжатия повышают. Этот способ используется для сварки стержней из стали, алюминия и латуни небольшого диаметра с площадью контакта до 1500–2000 мм².

Для соединения стержней большого диаметра применяется *сварка оплавлением*. При этом не требуется подгонка кромок. После включения тока заготовки сводят до соприкосновения, и в отдельных местах контакта благодаря высокой плотности тока происходит оплавление. Прилегающий к стыку металл нагревается до пластического состояния, и в этот момент производится его осадка. В процессе осадки с торцов выдавливается жидкий металл, вместе с ним удаляются из шва окислы и загрязнения. Применяют два варианта сварки: непрерывным и прерывистым оплавлением. Сварка *непре-*

рывным оплавлением описана выше. При *прерывистом* оплавлении зажатые в захватах 2 заготовки сближают под током. Быстро повторяя следующие одно за другим замыкание и размыкание, добиваются оплавления всего сечения. Затем производится осадка, в процессе которой выключается ток.

Метод оплавления имеет ряд преимуществ перед сваркой сопротивлением: поверхность стыка не требует особой подготовки, можно сваривать различные металлы (быстрорежущую и углеродистую сталь, медь и алюминий). Удельное давление осадки составляет 3–6 кгс/мм² (39–59 МН/м²). Плотность тока принимается для сталей 20–60 А/мм². Припуск на сварку составляет приблизительно 60 % от диаметра, напряжение 5–15 В, время 2–20 с.

Машины для стыковой сварки в основном стационарные. В машинах с ручным приводом сжатие заготовок и осадка осуществляются вручную. Качество сварки зависит от оператора. В машинах автоматического действия все операции выполняются по заданной программе.

Привод в автоматах пневматический или гидравлический. Стыковые машины сокращенно обозначают: МСР-25, МСГА-300.

Параметрами *режима* стыковой сварки являются *плотность тока, давление и время сварки*. В отличие от точечной и шовной сварки, время протекания сварочного тока определяется косвенно через величину осадки, которая зависит от установочной длины. *Установочной длиной* называется расстояние от торца заготовки до внутреннего края электрода стыковой машины, измеренное до начала сварки; оно зависит от свойств металла и размеров заготовки. Установочную длину выбирают по специальным таблицам или экспериментально.

Преимущества:

Высокая производительность процесса сварки, лёгкость автоматизации процесса, не требуются сварочные материалы.

Недостатки:

Требуется специальное дорогое оборудование.

Применение

Для сварки стержней арматуры, штоков, валов и т. п. в машиностроении. Способ незаменим в производстве свёрл большого сечения.

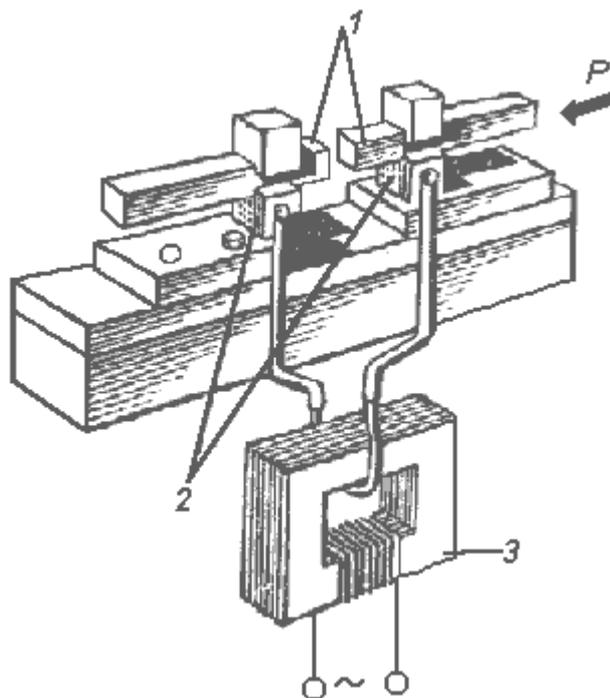


Рис. 4.24. Схема контактной стыковой сварки

4.9.2. Точечная электроконтактная сварка

При *точечной сварке* листы сваривают между собой не по всей поверхности касания, а лишь в отдельных точках (рис. 4.25).

Сущность процесса: тщательно зачищенные листы 2 накладывают друг на друга внахлестку и помещают между двумя медными, охлаждаемыми водой, электродами 3, подключёнными ко вторичному витку понижающего трансформатора 4. Верхний хобот 1 сварочной машины может перемещаться в вертикальном направлении, а нижний – неподвижный.

Затем листы сжимают между электродами с усилием P , после чего кратковременно включают сварочный ток большой силы, который доводит металл в месте контакта до плавления ядра 5 и до пластического состояния зоны 6. Ток автоматически выключается, жидкая ванна металла (ядро сварочной точки) затвердевает под действием усилия P , что предупреждает образование усадочной раковины.

Точечная сварка может производиться на мягких и жёстких режимах.

Мягкие режимы характеризуются большой продолжительностью протекания тока в сварочной цепи (плавным нагревом) и меньшей его плотностью: плотность тока 80–150 А/мм², усилие на электродах 15–40 МН/м², время протекания тока 0,5–3 с. В этом случае возникает более обширная зона термического влияния.

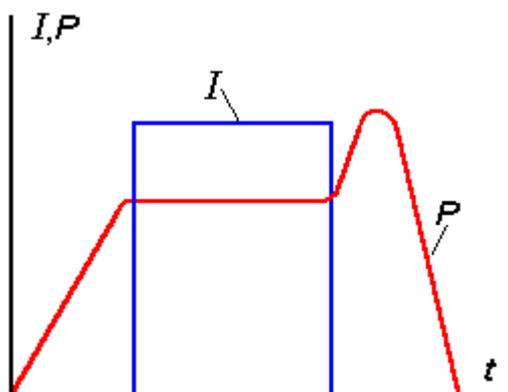


Рис. 4.26. Циклограмма контактной точечной сварки

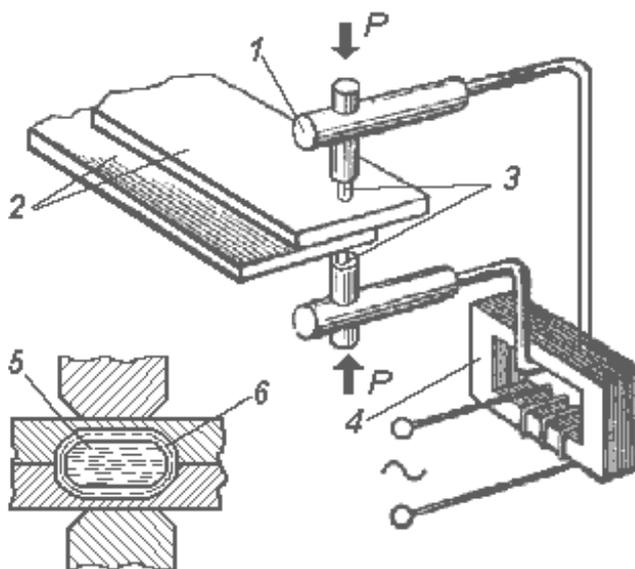


Рис. 4.25. Схема контактной точечной сварки

На таких режимах сваривают углеродистые, низколегированные стали и стали, склонные к закалке.

Жёсткие режимы характеризуются очень малой длительностью протекания тока и большой его плотностью: плотность тока 120–360 А/мм²; время 0,001–0,01 с. На этих режимах сваривают листы малой толщины (0,1–1,0 мм), особенно из нержавеющей и жаропрочных сталей,

а также металлы с высокой электро- и теплопроводностью, не допускающие перегрева околошовной зоны (Al, Mg, Cu и их сплавы). Режим точечной сварки выбирается по соответствующим нормативным (справочным) данным и задается в виде циклограмм (рис. 4.26).

Оборудование для точечной электроконтактной сварки

В настоящее время широко применяют специализированные точечные машины-агрегаты, снабженные роботами. Они обычно входят в состав автоматических линий (например, линий по сварке кузовов автомобилей). Точечные переносные машины (“клещи”) изготавливают только автоматического действия, часто снабжёнными роботами. Они выполняют сварку на переменном токе. Существуют также машины, выполняющие сварку на постоянном токе. Их называют точечными машинами с импульсом постоянного тока и обозначают сокращенно МТИП-300-1, МТИП-450-3, МТИП-600-5. Эти машины используют, главным образом, для сварки лёгких сплавов алюминия и магния.

Преимущества:

Это один из самых высокопроизводительных способов сварки. Не требуется высокая квалификация сварщика. Не нужны сварочные материалы.

Недостатки:

Дорогое оборудование, сложные автоматы и роботы, сварка ограничена только листовыми нахлесточными швами. Ширина изделий ограничивается вылетом хобота.

Применение

Точечная сварка применяется в вагоностроении, в самолётостроении, в приборостроении, в судостроении и сельхозмашиностроении, в строительстве и т. д. Незаменима точечная сварка при изготовлении кузовов легковых автомобилей, кабин тракторов и грузовых автомобилей.

С помощью точечной сварки свариваются практически все металлы и их сплавы: листы легированной стали толщиной до 10 + 10 мм; нержавеющей стали толщиной до 8 + 8 мм; сплавы алюминия АМц, АМг, Д1, Д16, Д20 и др. толщиной до 8 + 8 мм; сплавы магния (МА1, МА8, МА21 и др.) толщиной до 8 + 8 мм; медь и её сплавы (Л96, Л90, Л68 и др.) толщиной до 6 + 6 мм; титан и его сплавы (ОТ-4, ОТ4-1, ВТ16) толщиной до 8+8 мм. Можно сваривать в пакете от двух до пяти листов. Особенно выгодно применять точечную сварку при замене клёпаных и резьбовых соединений.

4.9.3. Шовная (роликовая) электроконтактная сварка

Сущность ***роликовой сварки*** (рис. 4.27) заключается в том, что свариваемые листы 2 пропускаются между роликами (электродами) 1 сварочной машины. При этом образуется сварной шов, состоящий из отдельных свар-

ных точек, частично перекрывающих друг друга. Электроды подключаются ко вторичной обмотке, которая состоит из одного витка.

Понижающий трансформатор 3 рассчитан на получение напряжения 2–12 В, сварочный ток может составлять тысячи ампер.

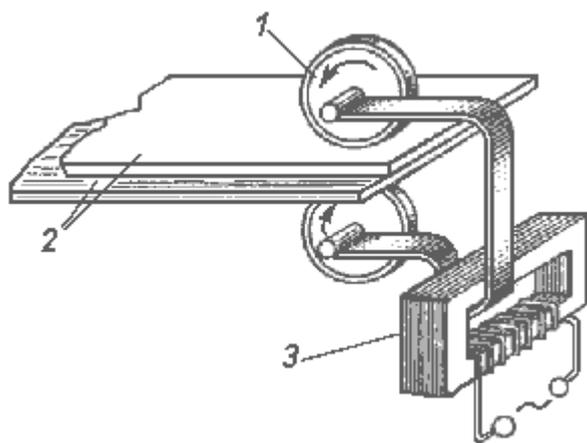


Рис. 4.27. Схема контактной шовной сварки

Различают две основных разновидности шовной сварки:

1. *С непрерывным включением сварочного тока* и непрерывным движением заготовок (рис. 4.28, а).

2. *С прерывистым включением тока* и непрерывным перемещением заготовок (рис. 4.28, б).

Первый цикл предназначен для сварки коротких швов. Второй цикл – для сварки длинных швов и сварки металлов, для которых опасен перегрев.

Короткие швы сваривают от одного конца заготовки к другому, а длинные – от середины к концам.

Параметрами *режима* шовной сварки являются *плотность тока* (до 4000 А/мм^2); *давление* (достигает 7 МН/м^2); *время протекания тока* – до 0,3 с; *время отключения тока* (паузы) – до 0,7 с; *скорость сварки* 0,5–3 м/мин.

Шовные машины бывают переносные и стационарные, специализированные и универсальные, полуавтоматического (педального) и автоматического действия, имеющие пневматический механизм сжатия роликов. Диаметр роликов равен 40–350 мм. Педальные машины (типа МШП) выполняют сварку на переменном токе. Автоматические машины (типа МШШИ) – на переменном токе или на постоянном (с импульсом постоянного тока).

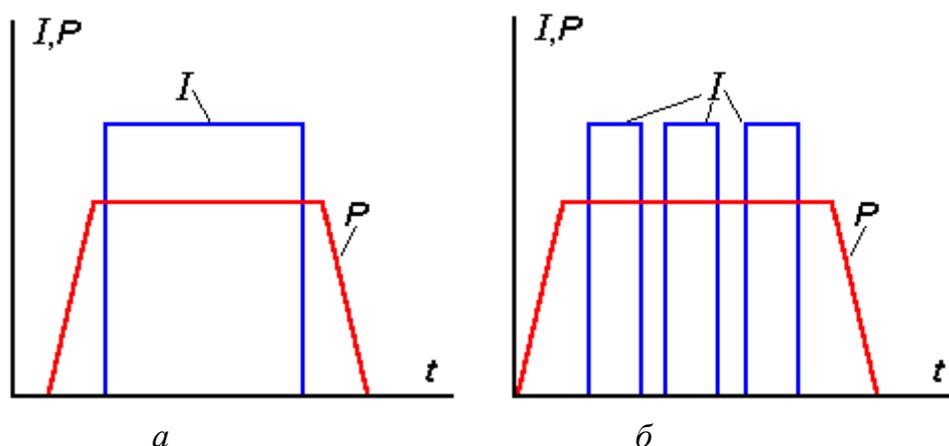


Рис. 4.28. Циклограммы контактной шовной сварки

Преимущества:

Шовные машины могут производить как прерывистую сварку, так и сплошным швом. Обеспечивают высокую герметичность и хороший внешний вид шва. Не требуется высокая квалификация сварщика.

Недостатки:

Сложное оборудование. Особенно сложна конструкция узла токоподвода к вращающимся роликам-электродам. При сварке герметичных швов требуется подготовка в виде отбортовки.

Применение

Шовная сварка применяется в массовом производстве при изготовлении топливных баков и других сосудов из сталей и цветных металлов, а также из стальных листов с покрытием (оцинкованные, лужёные, освинцованные и др.).

Шовной сваркой сваривают листы толщиной от 0,3 до 3 мм.

Ролико-стыковая сварка труб с продольным сварным швом является разновидностью шовной электроконтактной сварки.

4.9.4. Конденсаторная сварка

Сущность этого способа контактной сварки состоит в том, что необходимая для сварки энергия накапливается в конденсаторе K (рис. 4.29), работающем от выпрямителя B , а затем через трансформатор T разряжается на свариваемые заготовки. Существуют *бестрансформаторная* конденсаторная сварка (применяется для сварки проволоки малого диаметра) и *трансформаторная*, с

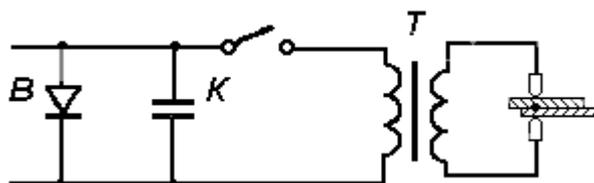


Рис. 4.29. Схема конденсаторной сварки

помощью которой можно производить точечную сварку.

Преимуществом конденсаторной сварки является малая потребляемая мощность. Такую установку можно включать в осветительную сеть, так как некоторые машины имеют мощность не более мощности обычной настольной лампы.

4.10. Специальные виды сварки

4.10.1. Плазменная сварка

Существует четыре агрегатных состояния вещества – твёрдое, жидкое, газообразное и плазменное.

В газовой среде при повышенных давлениях и при высоких плотностях тока от атомов отрываются не только внешние, валентные электроны, но и электроны внутренних орбит. Образуется поток, состоящий из частично оголённых ядер и отделившихся от них электронов, обладающий высокой температурой порядка 10000–50000 °С – *плазма*. Различают «горячую» и «хо-

лодную» (ненастоящую) плазму. При **плазменной сварке** применяется холодная плазма.

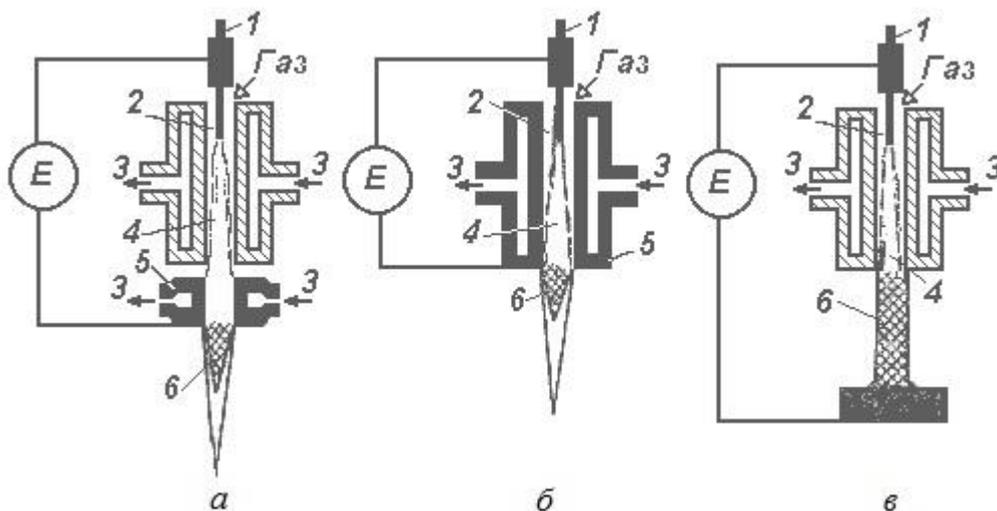


Рис. 4.30. Схемы дуговых плазменных головок

Плазменную струю получают с помощью плазменной горелки (*плазмотрона*), рис. 4.30. Горелка питается постоянным током 60–80 В прямой полярности от источника с падающей характеристикой. Дугу зажигают с помощью осциллятора. При этом дуговой разряд 4 возбуждается в канале 2 между электродом 1 из вольфрама и медным соплом 5, охлаждаемым водой 3 (рис. 4.30, а). Канал электрически изолирован от сопла и электрода. Вдоль дуги по каналу пропускают газ – аргон, гелий, азот, водород и пр. Газ проходит через сопло, сжимая столб дуги, ионизируется и выходит из сопла в виде ярко светящейся струи б (плазмы) с температурой 10000–50000 °С.

Различают плазмотроны:

а) с **раздельным соплом и каналом**, со струей, выделенной из столба дуги (*струя косвенного действия*), рис. 4.30, а;

б) с **совмещённым соплом и каналом**, со струей, выделенной из столба дуги (*струя косвенного действия*), рис. 4.30, б;

в) с **совмещённым соплом и каналом**, со струей, совпадающей с токоведущим столбом дуги (*струя прямого действия*), рис. 4.30, в.

В первых двух случаях плазменную струю (факел) используют как независимый источник теплоты с температурой до 16000 °С. Струя, совпадающая с токоведущим столбом дуги, используется для обработки только электропроводных материалов и имеет температуру до 30000–50000 °С.

В случае струи косвенного действия оператор обычно производит сварку «на весу» т. е. без применения подкладки под свариваемые кромки заготовок в зоне формирования шва. Сварку выполняют в основном без присадки, вручную или автоматизированным методом.

Следует отметить, что плазменная струя в связи с небольшим расходом газа и большой скоростью истечения, способствующей подосу воздуха, не

обеспечивает достаточной защиты материала. Поэтому горелки снабжают вторым соплом, расположенным концентрически вокруг первого, для дополнительной подачи защитного газа. Недостаток аргона как одноатомного плазмообразующего газа заключается в его низкой теплостойкости, что обуславливает малую эффективную тепловую мощность плазменной дуги, особенно выделенной из столба дуги. Для получения мощной плазменной струи косвенного действия, используемой для резки, применяют двухатомные газы (водород или азот). Способность этих газов к диссоциации молекул в дуге обеспечивает перенос большого количества энергии из столба дуги на поверхность материала. Однако их применение приводит к быстрому износу электрода и сопла горелки. Поэтому эти газы используют в смеси с аргоном: аргон – как защитный газ, азот или водород – как плазмообразующие. Одним из очень важных параметров *режима* сварки струей прямого действия является *зазор* между соплом плазмотрона и кромками заготовок. Этот зазор тщательно регулируется и фиксируется.

Оборудование

Установки для плазменной сварки имеют источник питания дуги, плазмотрон, баллоны для плазмообразующего и защитного газов, аппаратуру для контроля и регулирования расхода газов, систему водяного охлаждения плазмотрона. Разработаны установки общего применения типа МПИ-3, МПУ-4, МПУ-5 и др. Каждая из них предназначена для сварки заготовок определённой толщины. Так, на установке МПИ-3 можно выполнять микроплазменную сварку заготовок толщиной от 0,05 мм до 1,0 мм, на установке МП-5 – сварку заготовок толщиной до 3–6 мм. В связи с этим каждая установка снабжена соответствующим плазмотроном (горелкой), позволяющим применять максимальный сварочный ток.

Преимущества:

Плазменная струя позволяет регулировать температуру факела в широких пределах. Высокая устойчивость процесса образования плазмы позволяет получать микроплазменную струю при токах до 0,5 А, которой можно сваривать металлы толщиной в несколько десятков микрон. Мощной концентрированной струей можно сваривать металлы толщиной 15 мм за один проход и резать металлы узким резом. Не требуется вакуум.

Недостатки:

Быстро изнашиваются сопло и электроды плазмотрона. Для обработки различных толщин металлов требуются установки с разными параметрами (для каждой толщины – своя установка). Конфигурация швов и их расположение в пространстве ограничивается весом и габаритами плазмотрона.

Применение

Плазменной струёй можно сваривать, резать и наплавлять все металлы и их сплавы, а также полупроводники и диэлектрики.

Особенно эффективна микроплазменная сварка тонколистовых заготовок из нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов, тугоплавких металлов и их сплавов (ниобий, молибден, титан, цирконий и др.). С помощью плазменной струи производят резку любых материалов, наплавку изношенных деталей, наплавку меди на сталь, нанесение жаростойких и коррозионностойких защитных покрытий.

Плазменной струей можно испарять материалы. Конденсацией паров материалов, испаряемых плазменной струёй, получают монокристаллы полупроводниковых материалов и чистых металлов, таких, как вольфрам, молибден, ниобий и др. Плазменную струю можно использовать для получения тонких металлических нитей очень высокой прочности.

4.10.2. Электронно-лучевая сварка

При *электронно-лучевой сварке* нагрев металла производится *электронным лучом* – сжатым потоком электронов, быстро перемещающимся в сильном электрическом поле.

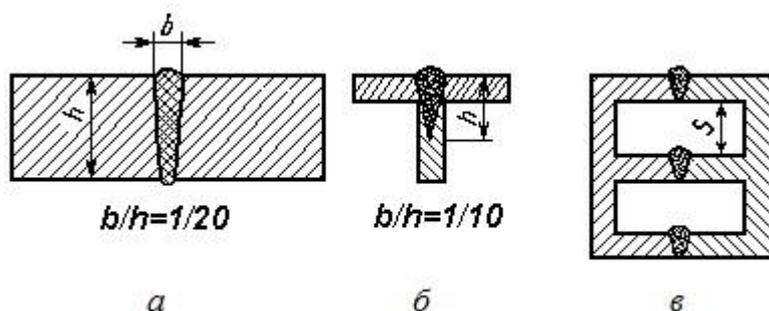


Рис. 4.31. Типы сварных соединений, выполняемых электронно-лучевой сваркой

Известно, что при использовании обычных сварочных источников (дуга, пламя) металл нагревается с поверхности и тепло распространяется в стороны и вглубь в виде полукруга. Электронный луч проникает в металл на

глубину в несколько миллиметров, и теплота выделяется в самом металле, причем наиболее интенсивно на некоторой глубине под его поверхностью, рис. 4.31.

Отношение глубины проплавления h к ширине шва b может достигать 20:1; такое проплавление называется *кинжальным*, рис. 4.31, *а*, *б*. Такая форма шва и небольшое, сконцентрированное на малой площади, количество теплоты, вводимой в сварное соединение, резко уменьшает возможность деформации, долю наплавленного металла и опасных структурных превращений в околошовной зоне.

Для ограничения температуры нагрева зоны термического влияния, а также при сварке легко испаряющихся металлов осуществляют подачу тока короткими мощными импульсами с частотой от 1 до 3000 Гц и продолжительностью от 0,01 до 0,00005 с.

Оборудование

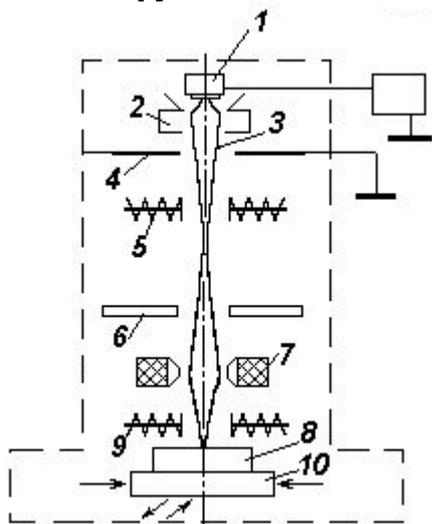


Рис. 4.32. Схема электронно-лучевой сварки

Установка для электронно-лучевой сварки состоит из вакуумной камеры, в которой поддерживается в процессе сварки вакуум 10^{-4} – 10^{-5} мм рт. ст. ($133 \cdot 10^{-4}$ – $133 \cdot 10^{-5}$ Н/м²), и *электронной пушки* – генератора электронного луча (рис. 4.32).

Пушка имеет вольфрамовый катод *1*, заключенный в кольцеобразный формирующий электрод (цилиндр Венельта) *2*, и расположенный под ним дисковый анод *4* с центральным отверстием для пропускания электронного луча *3* от катода к заготовке *8*, закрепленной на столе *10*.

К полюсам сварочной установки подводится высокое напряжение (от 10 до 150 кВ), ток постоянный небольшой силы (35–

1000 мА). При нагреве катода *1* с его поверхности излучаются электроны и со скоростью, соизмеримой со скоростью света, под действием большой разности потенциалов устремляются к аноду *4*. Магнитное поле юстировочных катушек *5* направляет луч по оси пушки. Диафрагма *6* отсекает энергетически малоэффективные краевые зоны луча. Магнитная линза *7* фокусирует (сжимает) луч до диаметра 0,01–1,2 мм на поверхности заготовки.

Скорость сварки определяется скоростью перемещения заготовки в камере под неподвижным лучом или отклонением самого луча с помощью отклоняющей системы *9*. Оптическая система, состоящая из зеркала, объектива с осевым отверстием и микроскопа, позволяет вести наблюдение за процессом сварки при многократном увеличении (или с помощью телевизионной системы).

В зависимости от величины напряжения между катодом и анодом (так называемое ускоряющее напряжение) различают два типа электронно-лучевых пушек: *низковольтные*, с ускоряющим напряжением 10–30 кВ, и *высоковольтные*, с ускоряющим напряжением до 150 кВ. Кроме того, пушки бывают *длиннофокусные*, с фокусным расстоянием 300–500 мм. В этом случае изделие не является элементом электрической цепи, т. е. становится возможна обработка диэлектриков. Существуют также *короткофокусные* пушки (фокусное расстояние 30–40 мм), в которых анодом является само изделие. Эти пушки имеют меньшие размеры. Такими пушками можно сваривать только электропроводные материалы.

Преимущества:

Благодаря идеальной защите от вредного влияния воздуха обеспечивается высокая чистота металла и качество сварки. Можно сваривать за один проход узким (кинжальным) швом заготовки толщиной до 200 мм без разделки кромок при скорости сварки до 100 м/час. Хороший внешний вид сварного соединения (зеркальная поверхность). Возможность сварки через узкие отверстия в недоступных местах (рис. 4.31, в).

Недостатки:

Дорогое и сложное оборудование; размер свариваемых заготовок и оперативное управление процессом сварки ограничено вакуумной камерой; низкая производительность процесса из-за того, что много времени нужно для получения высокого вакуума; требуется биологическая защита персонала от рентгеновского излучения, возникающего при соударении электронного пучка с твёрдой поверхностью изделия.

Применение

Для сварки всех материалов, в том числе разнородных, например, металлов с керамикой, стеклом; особенно высокое качество обеспечивается при сварке тугоплавких и химически активных металлов: ниобия, тантала, молибдена, вольфрама, титана, циркония и др.; минимальная толщина свариваемых заготовок составляет 0,02 мм.

С помощью электронного луча, кроме процесса сварки, можно успешно прошивать отверстия диаметром тоньше человеческого волоса, прорезать очень узкие пазы, щели, разрезать на части заготовки, особенно из драгоценных металлов, а также неметаллов (кварц, керамика, алмазы и др.). Края обработанной поверхности формируются ровными и чистыми, не требующими доводки, а структура смежных слоев металла при этом остается неизменной.

4.10.3. Сварка трением

Сварка трением происходит в твёрдом состоянии. При этом торцы свариваемых стержней сводятся до соприкосновения (рис. 4.33, а). Затем один из стержней приводится во вращение и сдавливается со вторым силой P . За счет трения выделяется тепло, и свариваемые поверхности разогреваются до пластического состояния. При этом разрушаются окисные пленки. Этот период называется *осадка*. Затем вращение мгновенно прекращается, усилие сдавливания увеличивается (*проковка*), и возникает сварное соединение за счёт сил межатомного взаимодействия. Иногда для сварки достаточно одной осадки, без проковки.

Основными параметрами **режима сварки** являются: удельное давление $P = 10\text{--}20$ кгс/мм², время $t = 3\text{--}10$ с; величина осадки 2–10 мм, скорость вращения V – до 3000 об/мин.

В производстве нашли применение сварочные машины, изготовленные по схеме рис. 4.33, а. Остальные схемы имеют ограниченное применение или

вообще не применяются из-за сложности механизма осуществления схемы. Самым ответственным и быстро выходящим из строя является узел мгновенного торможения, от которого в основном и зависит качество сварки.

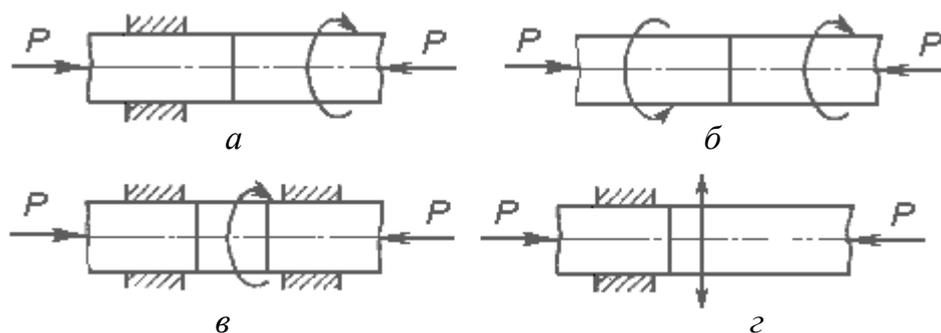


Рис. 4.33. Принципиальные схемы сварки трением

Существуют разные типы сварных соединений, которые могут быть осуществлены по двум схемам:

1) **сварка встык стержней и труб** (рис. 4.34, а, б) или сварка трубы со стержнем (рис. 4.34, в);

2) **сварка стержня или трубы с листом** (рис. 4.34, г, д, е). При этом для сварки стержня с листом необходимо, чтобы лист имел выступ по размеру стержня.

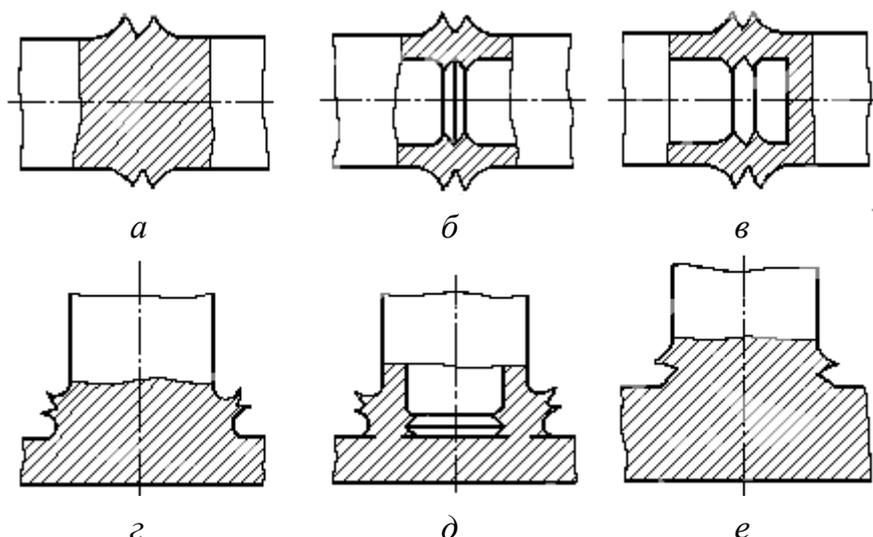


Рис. 4.34. Типы сварных соединений, выполняемых сваркой трением

Преимущества:

При сварке трением расходуется в 5–10 раз меньше электроэнергии, чем при контактной сварке. Нет разбрызгивания жидкого металла и искр, как при контактной электросварке.

Недостатки:

Дорогое оборудование, необходимость иметь сжатый воздух (0,4–0,6 МПа) для сдавливания заготовок или гидросистему, что ещё хуже. Быстрый износ и требование частой регулировки тормозных узлов.

Применение

Широко применяется сварка трением в инструментальной промышленности для изготовления свёрл, фрез, метчиков и т. п. При этом заготовки диаметром от 8 до 35 мм сваривают сваркой трением, а заготовки большего диаметра – электроконтактной сваркой.

В машиностроении сваривают рукоятки, валы, штоки, пуансоны и т. п. При сварке разнородных металлов требуется специальная оправка для формирования сварного соединения.

4.10.4. Холодная сварка

Холодная сварка осуществляется без нагрева при нормальных и даже при отрицательных температурах. Холодной сваркой свариваются только пластичные металлы.

Сущность процесса заключается в том, что под действием сжимающих усилий (выше предела текучести) металл пластически деформируется, при этом разрушаются окисные плёнки и свариваемые поверхности сближаются на расстояние действия межатомных сил. При этом происходит диффузионный обмен электронов внешних орбит атомов соединяемых металлов и образование сварного соединения.

Принципиальная схема холодной сварки представлена на рис. 4.35. Свариваемые заготовки 1 с тщательно зачищенной поверхностью 2 помещают между пуансонами 4, имеющими выступы 5. При сжатии пуансонов усилием P выступы вдавливаются в металл, пока опорные поверхности 3 пуансонов не упрутся в наружную поверхность свариваемых заготовок (рис. 4.35, а). Форма сварной точки зависит от формы выступов (рис. 4.35, з).

Холодной сваркой можно выполнять **точечные, стыковые** и **шовные** соединения.

При холодной стыковой сварке соединяемые стержни 7 зажимаются губками 6 с насечкой 8 для увеличения трения и сдавливаются (рис. 4.35, б). Для холодной шовной сварки применяют специальные ролики или получают соединение путем одновременного сдавливания по контуру. При этом пуансоны 9 и 10 строго центрируются с помощью корпуса 11 (рис. 4.35, в).

Преимущества:

Простота процесса и оборудования. Возможность сварки в полевых условиях, не нужны источники нагрева.

Недостатки:

Ограниченность мощности и величины сварных заготовок. Требуется специальное оборудование. Возможность сварки только пластичных металлов.

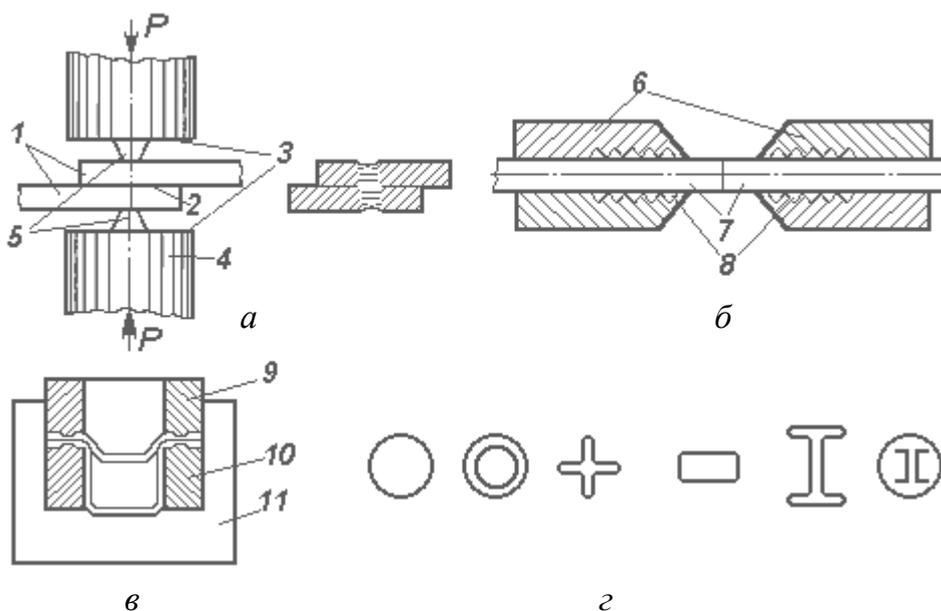


Рис. 4.35. Принципиальная схема холодной сварки

Применение

Холодной сваркой сваривают алюминий, медь, свинец, никель, золото, серебро и их сплавы; однородные и разнородные металлы в приборостроении, при изготовлении бытовых приборов, в электромонтажном производстве. Для сварки медных и алюминиевых проводов существуют переносные рычажные клещи.

5.10.5. Диффузионная сварка в вакууме

При *диффузионной сварке* соединение образуется в результате взаимной диффузии атомов в поверхностных слоях контактирующих материалов, находящихся в твёрдом состоянии. Температура нагрева устанавливается равной температуре рекристаллизации. При сварке разнородных металлов температура нагрева берётся не выше температуры рекристаллизации более легкоплавкого металла.

Диффузионную сварку в большинстве случаев выполняют в вакууме, однако она возможна и в аргоне.

Перед сваркой (рис. 4.36) заготовки 3 тщательно зачищают, помещают в вакуумную камеру 2 (вакуум $133 \cdot 10^{-3}$ – $133 \cdot 10^{-5}$ Н/м²), сдавливают с помощью механического груза 1 (или гидроустройства) и нагревают высокочастотным индуктором 4 до температуры рекристаллизации. Сжимающее усилие составляет 1–20 МН/м² и действует на заготовки в течение 10–30 мин.

Все вводы в камеру (5 – к вакуумному насосу, 6 – к высокочастотному генератору) тщательно герметизируются. Вакуум способствует удалению со свариваемых поверхностей загрязнений и окисных плёнок. При взаимной диффузии образуется промежуточный слой, который увеличивает прочность сварного соединения. При сварке однородных материалов границу соеди-

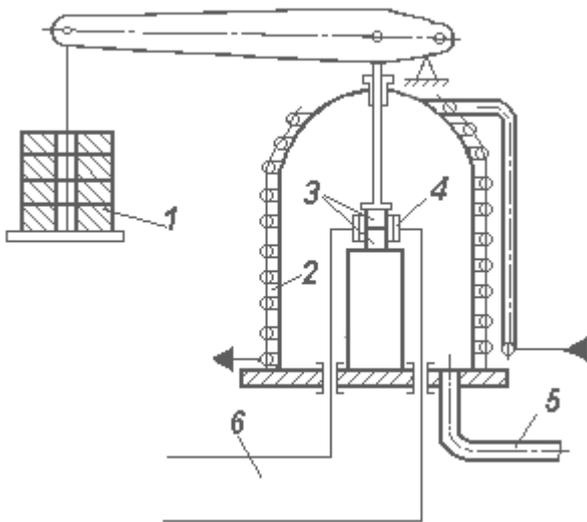


Рис. 4.36. Схема диффузионной сварки в вакууме

нения можно рассмотреть только в микроскоп. При сварке разнородных материалов, не обладающих взаимной растворимостью, в месте стыка образуется хрупкая прослойка интерметаллических соединений. В этом случае подбирают прослойку из металла, который способен образовывать твердые растворы со свариваемой парой.

Преимущества:

При диффузионной сварке не требуется высокий нагрев до расплавления, а только до температуры рекристаллизации. По этой причине отсутствуют термические деформации. Не требуются флюсы, присадочная про-

волока. Можно сваривать различные композиции материалов.

Недостатки:

Одним из недостатков этого способа является низкая прочность сварного соединения. Размер свариваемых изделий ограничивается размерами вакуумной камеры. Ограничена геометрия сварных соединений.

Применение

Применяется диффузионная сварка в радиоэлектронике и электронной технике, в приборостроении. Этим способом можно сваривать трудносвариваемые металлы: вольфрам, молибден, чугун, твердые сплавы, а также стекло с металлами. Можно получать многослойные изделия.

4.10.6. Ультразвуковая сварка

При *ультразвуковой сварке* используются давление и вибрации при взаимном трении свариваемых поверхностей. Силы трения возникают в результате действия на заготовки механических колебаний с ультразвуковой частотой 15–30 кГц. Для получения механических колебаний высокой частоты используется магнито-стрикционный эффект, рис. 4.37. Этот эффект заключается в изменении размеров некоторых металлов и сплавов под действием переменного магнитного поля.

Свариваемые заготовки 5 размещаются на опоре 6. Наконечник 4 присоединен к рабочему инструменту 3 и вместе с трансформатором продольных колебаний 2 представляет волновод. Волновод присоединен к магнито-стрикционному вибратору 1 с катушкой. Переменный ток от высокочастотного генератора, проходя по обмотке катушки, возбуждает в ней переменное магнитное поле, под действием которого вибратор 1 изменяет свои размеры.

Эти колебания (расширение и сжатие) передаются волноводу, который увеличивает их амплитуду с 1–3 мкм до десятков мкм на наконечнике 4.

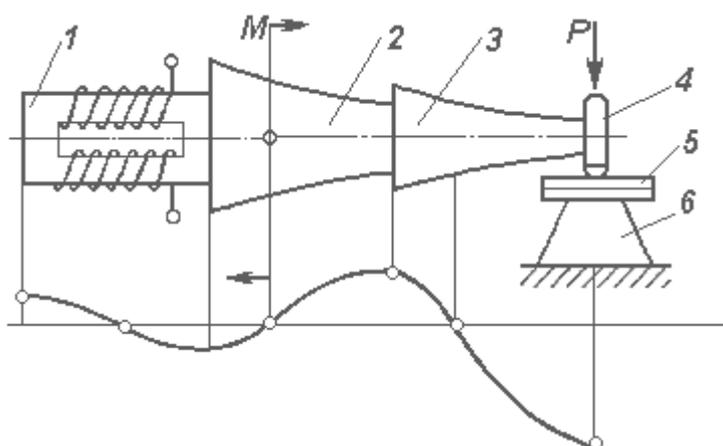


Рис. 4.37. Схема ультразвуковой сварки

В результате ультразвуковых колебаний в тонких слоях контактирующих поверхностей разрушаются поверхностные плёнки, слои металла нагреваются и пластически деформируются. При сближении свариваемых поверхностей на расстояние действия межатомных сил между ними возникает прочная связь.

Преимущества:

Низкие температуры нагрева при ультразвуковой сварке (меди до 600 °С, алюминия до 200–300 °С) позволяют избежать изменений структуры в зоне термического влияния и образования сварных деформаций. Не требуются сварочные материалы и высокая квалификация сварщика.

Недостатки:

Малая мощность. Поэтому можно сваривать листы толщиной до 1 мм.

Применение

Ультразвуковая сварка применяется для получения точечных и шовных соединений внахлестку. Можно сваривать металлы в однородных и разнородных сочетаниях. Успешно можно приварить тонкие листы и фольгу к заготовке неограниченной толщины.

4.10.7. Сварка лазерным лучом

Для *лазерной сварки* и других видов обработки материалов применяют оптические квантовые генераторы – *лазеры*, дающие световые лучи с высокой плотностью энергии. Квантовые генераторы преобразуют электрическую, световую, тепловую или химическую энергию в излучение электромагнитных волн: видимого (*лазеры*), инфракрасного (*мазеры*) или ультрафиолетового диапазона.

Излучателем – активным элементом – могут быть как твёрдые вещества (рубин и др.), так и различные жидкости (растворы окиси неодима, красители и др.), а также газы и газовые смеси (водород, азот, аргон, углекислый газ и др.). Лазер может работать в импульсном или непрерывном режиме.

В квантовых технологических генераторах в качестве излучателя используется кристалл рубина (это Al_2O_3 , в котором небольшое количество атомов алюминия замещено атомами хрома). Лазер состоит из розового рубинового кристалла 2, ксеноновой лампы 1, являющейся нагнетателем

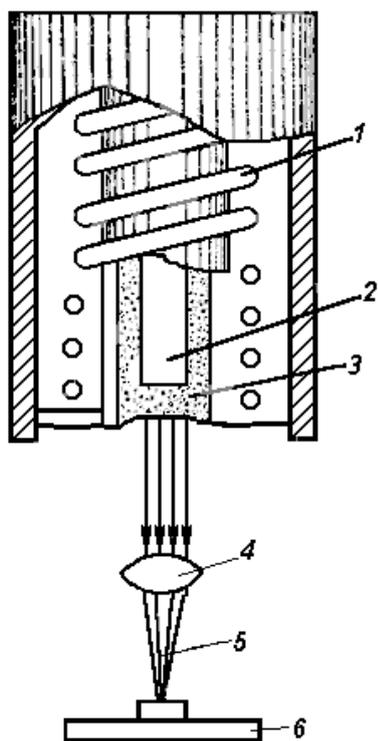


Рис. 4.38. Схема сварки
ки
лазерным лучом

энергии, охладителя 3, линзы 4 для фокусирования луча 5 в точку диаметром в несколько микрон на поверхности изделия 6 (рис. 4.38). Для визуального наблюдения за процессом сварки служит стереоскопический микроскоп. Очень важной является защита глаз оператора от излучения. Для этого в микроскоп встроен затвор.

Преимущества:

Сварка лазером выгодно отличается от электронно-лучевой сварки тем, что может выполняться в любой прозрачной среде – на открытом воздухе, в вакууме и т. д. Лазерная сварка более проста и безопасна, может быть использована в недоступных местах. Малая длительность импульсов и концентрированный луч позволяют уменьшить зону термического влияния до нуля.

Недостатки:

Низкий КПД использования энергии накачки (менее 2 %). При этом требуется мощное охлаждение установки. По этой причине лазер может работать только с длительными перерывами между импульсами (от 1 до 100 в минуту) для

охлаждения в паузах.

Применение

Широкое применение лазерная сварка находит в радиоэлектронике и электронной технике при сварке контактов проводников с плёнками на микросхемах, твердых схемах и электроэлементах. Лазерным лучом можно сваривать любые композиции металлов. Можно сваривать очень тонкие проволоки диаметром в несколько десятков микрон.

С помощью лазера можно выполнять резку любых металлов и металлокерамических заготовок толщиной от 0,5 до 10 мм методом прямого испарения (узким резом); производить прошивку отверстий. Лазером можно получать отверстия диаметром до 5 мкм в металлах, рубине, алмазах, твёрдых сплавах. Такая резка и прошивка отличается высокой чистотой и точностью, может выполняться в любых пространственных положениях. При изготовлении изделий сложной геометрической формы используют системы перемещения с ЧПУ или управляемые ЭВМ.

На достаточно мощных установках непрерывного действия, с использованием в качестве излучателя углекислого газа, можно сваривать стальные заготовки толщиной до 10–15 мм, накладывая непрерывные и прерывистые швы (типа точечной сварки).

Фотонная (световая) сварка производится с использованием световой энергии мощной электрической дуги с помощью фокусирования её кварцевой линзой. При этом можно прожечь стальной лист. Световым лучом может проходить значительные расстояния в воздухе.

4.10.8. Сварка взрывом

При **сварке взрывом** используется энергия направленного (кумулятивного) взрыва.

Сварка взрывом мгновенно соединяет поверхности двух заготовок, например, пластин 4 и 3 (рис. 4.39).

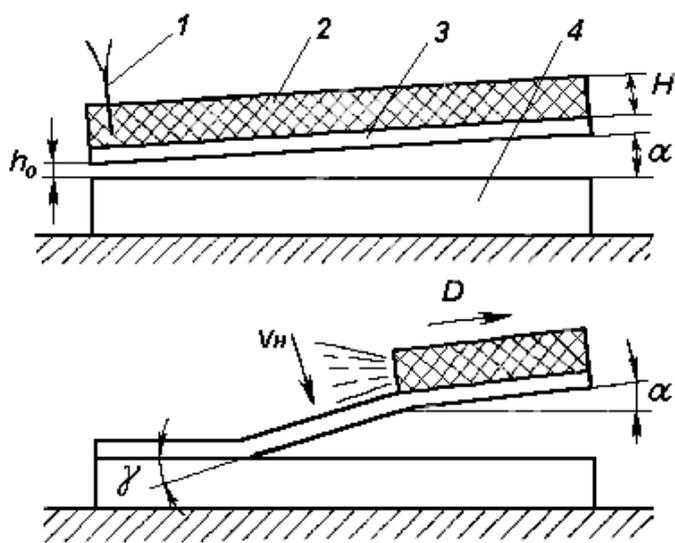


Рис. 4.39. Схема сварки взрывом

Одна из пластин неподвижна и является основанием. Вторая – подвижная – располагается под углом α , на расстоянии h_0 . На заготовку 3 укладывают взрывчатое вещество 2 толщиной H , а на краю пластины над вершиной угла α устанавливают детонатор 1. Сварка производится на жёсткой опоре. В результате взрыва расположенной под зарядом пластине 3 сообщается импульс.

Пластина 3 метается со скоростью 1000 м/с на поверхность

неподвижной пластины. В месте контакта метаемой пластины с основанием образуется угол γ , который перемещается вдоль соединяемых поверхностей. При соударении пластин из вершины угла γ кумулятивной струей выдуваются окисные плёнки и другие загрязнения. Поверхности сближаются до расстояния действия межатомных сил, и происходит схватывание по всей площади соединения. В зоне соударения металл течёт подобно жидкости и образует сварное соединение в виде волн.

Параметрами **режима сварки** являются: *скорость детонации D* , *нормальная скорость v_n метаемой пластины* и *угол γ встречи пластин при соударении*. Вес заряда берется равным 1,0–2,0 % массы метаемой пластины, угол γ составляет 2–16°. Взрывчатое вещество – аммонал, тол, гексоген и др.

Преимущества:

Быстрота процесса; возможность применения в труднодоступных местах конструкции. Сварной шов имеет более высокую прочность по сравнению со свариваемым металлом, так как во время сварки подвергается упрочнению.

Недостатки:

Сварка взрывом – опасный процесс, требующий специального полигона вне населённого пункта, для хранения взрывчатых веществ нужно соблюдать условия безопасности.

Применение

Для получения биметаллических пластин высокой прочности. Используется сварка взрывом в сочетании со штамповкой.

4.11. Виды сварных швов

По *расположению швов в пространстве* различают швы: *нижние* (рис. 4.40, а), *горизонтальные* (рис. 4.40, б), *вертикальные* (рис. 4.40, в), *потолочные* (рис. 4.40, г).

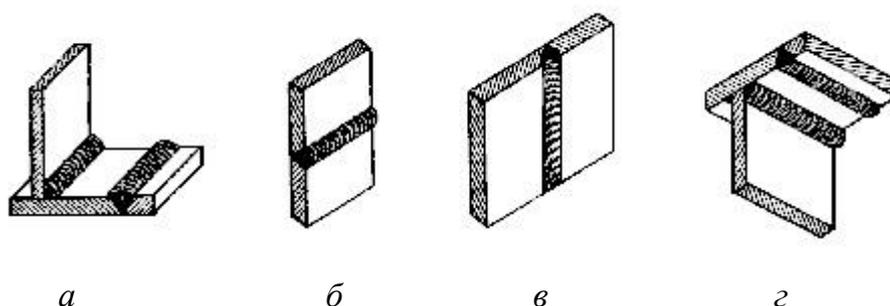


Рис. 4.40. Расположение шва в пространстве

При сварке необходимо стремиться выполнять швы в нижнем положении, так как при этом обеспечивается лучшее формирование и качество шва. Потолочные швы требуют наиболее высокой квалификации сварщика.

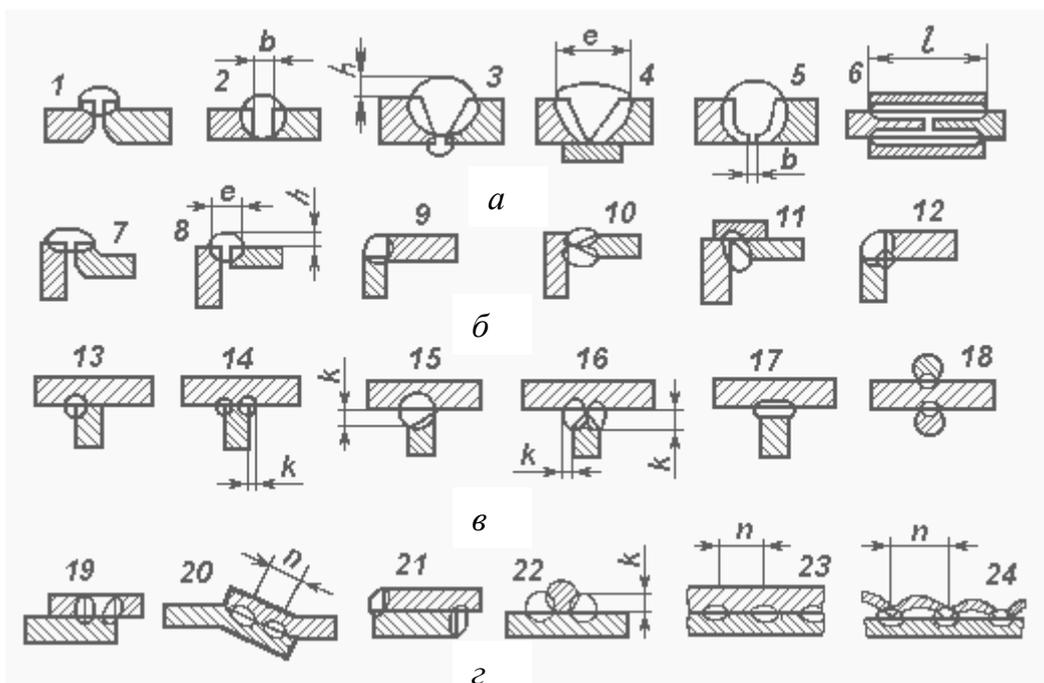


Рис. 4.41. Виды сварных соединений

По *виду сварного соединения* различают соединения: *стыковые* (рис. 4.41, а), *угловые* (рис. 4.41, б), *тавровые* (рис. 4.41, в), *нахлесточные* (рис. 4.42, з).

В зависимости от *положения относительно действия внешних сил* швы разделяются на *фланговые 1*, *лобовые 2*, *косые 3* (рис. 4.42).

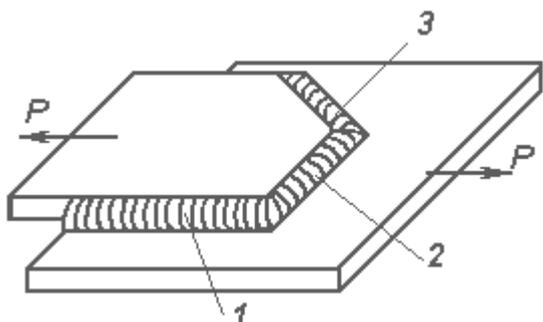


Рис. 4.42. Типы швов в зависимости от их положения относительно действия внешних сил

4.12. Деформации и напряжения при сварке и меры их предупреждения

Основными причинами образования деформаций и напряжений при сварке являются неравномерный нагрев сварной конструкции и усадка наплавленного металла. Различные металлы имеют разную усадку, измеряемую в процентах от первоначального линейного размера: алюминий 1,7–1,8 %; бронза 1,45–1,6 %; латунь 2,06 %; медь 2,1 %; сталь низкоуглеродистая 2,0 %.

Для уменьшения деформаций и напряжений при сварке нужно руководствоваться следующими рекомендациями.

1. Применять марки электродов, повышающие пластичность металла шва.
2. Выполнять швы с меньшим количеством наплавленного металла.
3. Избегать в конструкциях пересекающихся швов, особенно работающих с ударными нагрузками.
4. Ограничивать применение накладок и косынок.
5. Применять по возможности стыковые швы, так как они обеспечивают наименьшую концентрацию напряжений.
6. Использовать методы секционного изготовления конструкций.
7. Правильно выбирать тепловой режим при сварке. При сварке закаливающихся сталей применять предварительный, сопутствующий и после-сварочный подогрев. Температура подогрева для сталей 400–600 °С, для чугуна – 500–800 °С; для алюминия – 200–270 °С, для бронзы – 300–400 °С. Сварку при отрицательных температурах ведут при низкотемпературном

нагреве до 100–300 °С.

8. Применять *метод обратных деформаций*.

9. Применять *метод предварительных смещений*.

10. С целью уменьшения коробления листов швы длиной более 600 мм выполнять в *обратно-ступенчатом порядке*. Чем короче шов, тем меньше деформируется изделие.

11. Соблюдать *правильную последовательность наложения швов* таким образом, чтобы последующий шов вызывал деформацию, обратную образованной от предыдущего шва, например, при сварке двутавровой балки.

12. Предусматривать *свободную усадку шва*.

13. Сваривать швы можно напроход при длине не более 300 мм или *от середины шва к его концам* при длине до 600 мм. В этом случае в середине шва возникают напряжения сжатия. Если производить сварку от концов шва к середине, возникают напряжения растяжения, отчего могут образоваться трещины.

14. Если позволяют условия, для предотвращения деформаций применять *метод предварительных прихваток* или *рёбер жёсткости*.

15. Использовать *метод жёсткого закрепления заготовок* перед сваркой, применяя сборочно-сварочные приспособления и кондукторы.

16. Для снятия внутренних напряжений применять общий *отжиг* сварного изделия, *проковку шва и околошовной зоны*. Для устранения деформаций можно применять также *механическую правку* в холодном или горячем состоянии.

4.13. Основные виды дефектов сварных швов и их причины

Дефекты сварных швов разделяются на внешние и внутренние. К **внешним дефектам** относятся: нарушения установленных размеров и формы шва, наплывы (рис. 4.43, *а*), подрезы (рис. 4.43, *б*), наружный непровар (рис. 4.43, *в*), поверхностные трещины и поры (рис. 4.43, *з*), прожоги.

К **внутренним дефектам** относятся: газовая пористость и внутренние трещины (рис. 4.43, *д*), непровары (рис. 4.43, *е*), неметаллические включения (рис. 4.43, *ж*), образование крупного зерна из-за перегрева сварного соединения, пережог (окисление границ зёрен).

Нарушение размеров и формы шва – эти дефекты при ручной сварке являются результатом низкой квалификации сварщика, неверной подгонки свариваемых кромок, неправильного выбора величины сварочного тока.

Наплывы образуются из-за нарушения техники сварки, низкой квалификации сварщика, недоброкачественных электродов, несоответствия скорости сварки и величины сварочного тока.

Подрезы – из-за большого тока, удлиненной дуги, неправильного положения электрода или горелки.

Непровары – из-за низкой квалификации сварщика, некачественной подготовки свариваемых кромок (малый угол скоса, отсутствие зазора, большое притупление).

Наружные трещины – из-за жёсткой формы сварного соединения (например, пересекающиеся швы), неправильного теплового режима сварки, закрепления сварных заготовок.

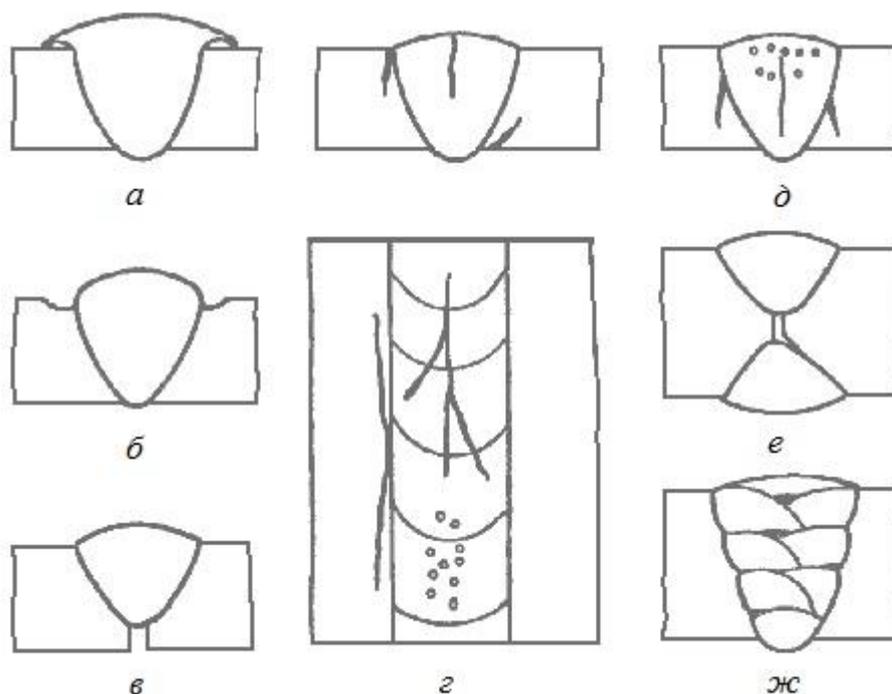


Рис. 4.43. Виды дефектов в сварных соединениях

Газовые поры – из-за загрязнений на свариваемых поверхностях (ржавчина, влага, масло и др.), отсыревших электродов и кромок, попадания воздуха в сварочную ванну, повышенного содержания углерода.

Перегрев и пережог – из-за неправильно выбранного режима сварки.

Неметаллические включения образуются при сварке малым сварочным током, при недоброкачественных электродах и флюсе, из-за загрязнений на свариваемых поверхностях. При неправильно выбранном режиме сварки шлак не успевает всплывать на поверхность и остается в металле шва в виде шлаковых включений.

Трещины в высокоуглеродистых и легированных сталях образуются вследствие напряжений, возникающих в металле от его неравномерного нагрева и структурных превращений. В этом случае требуется подогрев сварного соединения при сварке и отпуск сразу после сварки.

Причиной возникновения трещин может быть также повышенное содержание в стали серы и фосфора. В этом случае следует увеличить долю наплавленного металла за счет высококачественной сварочной проволоки Св-08А.

Для получения сварных швов высокого качества следует тщательно изучить свойства свариваемого материала и составить наиболее целесообразный и технически правильный технологический процесс сварки (подготовка кромок, режим и техника сварки, электроды и флюсы, присадочный материал и другие параметры сварки).

4.14. Контроль качества сварки

Контроль качества сварных соединений включает контроль качества свариваемого металла, электродов, флюсов, газов. Производится также контроль технической исправности оборудования, квалификации сварщика, текущий контроль сварки на всех этапах производства изделия, проверка сварных соединений готового изделия.

Окончательный контроль готовых сварных соединений осуществляется наружным осмотром, проверкой размеров швов, механическими испытаниями прочности соединений, испытаниями плотности шва, металлографическими исследованиями и контролем внутренних дефектов.

Механические испытания производятся на образцах, размеры и форма которых регламентированы, рис. 4.44. При испытаниях на растяжение на разрывной машине изготавливается образец (рис. 4.44, а) из основного или наплавленного металла. При этом определяются характеристики прочности и пластичности. Аналогично проводят механические испытания на растяжение сварного соединения с вырезкой образца из пластины или трубы на плоском образце (рис. 4.44, б). Схема испытания на изгиб (рис. 4.44, в) проводится до образования первой трещины. Максимальный угол загиба 180° характеризует хорошую пластичность. Испытание на ударную вязкость проводят с надрезом по шву (рис. 4.44, г).

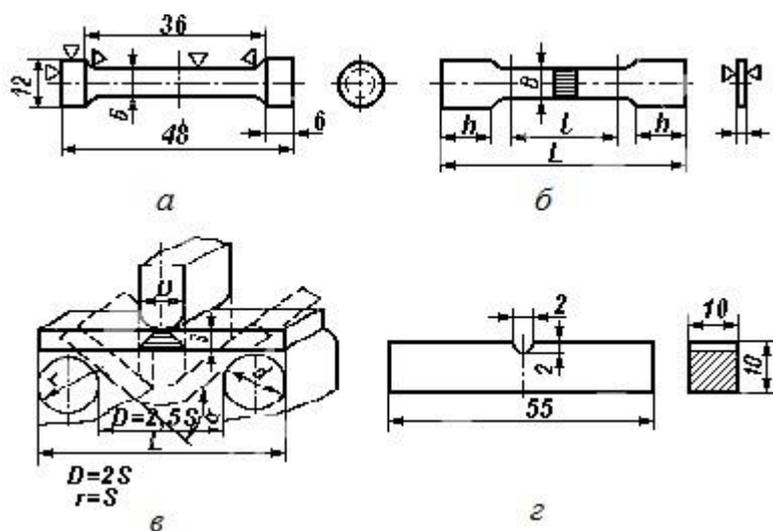


Рис. 4.44. Образцы для испытания механических свойств

Твёрдость сварного соединения определяют обычно на закаливающих сталях.

Металлографические исследования включают макро- и микроструктурный анализ. При макроструктурном анализе исследуют изломы, а также визуально видимые дефекты на макрошлифах, протравленных 25-процентным раствором азотной кислоты. При микроструктурном анализе исследуется структура на микрошлифах, протравленных 4-процентным раствором азотной кислоты. Исследование ведётся с помощью металлографического микроскопа и позволяет определить не только дефекты металла, но и дефекты режима сварки.

Коррозионные испытания сварных соединений проводятся в средах с моделированием условий эксплуатации изделия.

Гидравлические испытания производятся с целью проверки плотности швов и прочности. При испытаниях создают давление на 2 атм (0,2 МПа) выше рабочего и выдерживают 5 мин. Места, в которых обнаружена течь, отмечают мелом, вырубают и снова заваривают.

Пневматические испытания выполняются сжатым воздухом только при рабочем давлении. Дефекты обнаруживаются с помощью покрытия швов мыльным раствором или погружения изделия в воду. В целях безопасности пневматическое испытание производят только после предварительного гидравлического испытания сосуда.

Керосиновая проба является удобным, надёжным и широко распространённым методом контроля плотности швов (корпуса судов, резервуары, баки, контейнеры и т. п.). Для этого шов с одной стороны покрывают белой краской (порошок мела и вода), а с другой – смазывают керосином. Керосин способен проникать сквозь самые мелкие поры диаметром в несколько микрон и выявляется в дефектном участке в виде тёмных пятен на фоне белой краски. Способ не требует ни оборудования, ни квалификации.

Магнитный контроль основан на намагничивании сварных соединений и обнаружении полей магнитного рассеивания на дефектных участках.

Существует несколько разновидностей метода. При *методе магнитного порошка*, нанесенного на шов, дефект определяют по скоплению порошка (окалины). При *индукционном методе* магнитный поток в изделии наводят электромагнитом переменного тока. Рассеяние поля обнаруживают с помощью искателя (рис. 4.45). При *магнитографическом методе* на шов накладывается и прижимается ферромагнитная лента, на которой фиксируется магнитное изображение шва. Затем это изображение воспроизводится на экране электронно-лучевой трубки (рис. 4.46).

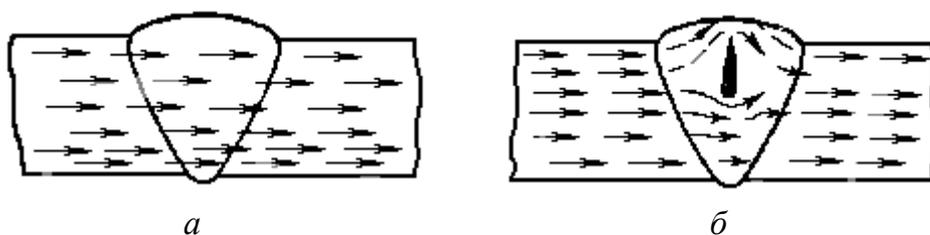


Рис. 4.45. Путь линий магнитного потока при прохождении через сварной шов:
а – без дефектов, *б* – при наличии дефекта

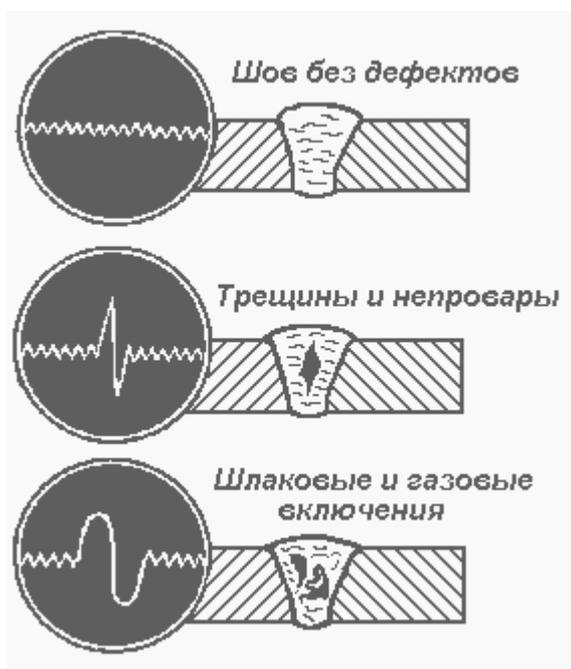


Рис. 4.46. Магнитографический метод контроля

выявления включений.

Просвечивание сварных соединений гамма-лучами. При этом источниками излучения служат радиоактивные изотопы: кобальт-60, тулий-170, иридий-192 и др. Ампулу с радиоактивным изотопом помещают в свинцовый контейнер. Техника просвечивания подобна рентгеновскому методу. Преимущество: дешевизна, простота, возможность применения в труднодоступных местах и в полевых условиях.

Рентгеновское просвечивание основано на способности рентгеновских лучей проникать сквозь металлы (рис. 4.47). Выявление дефектов происходит за счет того, что участки металла с дефектами и без дефектов по-разному пропускают излучение. Рентгеновские лучи, проходя через сварной шов, фиксируют дефекты в виде тёмных пятен.

Применяемые в промышленности рентгеновские аппараты позволяют просвечивать сварные соединения из стали толщиной до 200 мм, алюминия – до 300 мм, меди – до 25 мм. При этом обнаруживается большинство дефектов: крупные трещины, непровары и шлако-

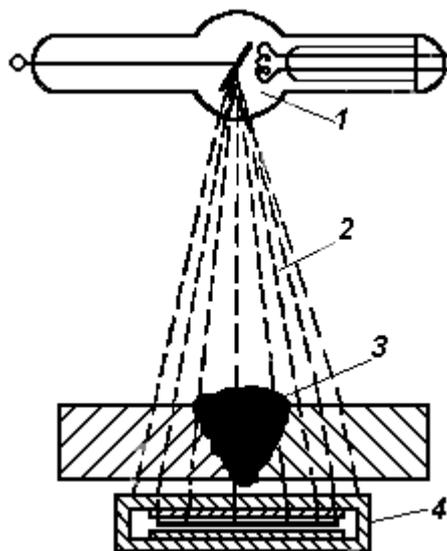


Рис. 4.47. Рентгеновское просвечивание сварного шва:

1 – рентгеновская трубка, *2* – излучение, *3* – шов, *4* – кассета с фотоплёнкой

Ультразвуковой контроль основан на способности высокочастотных, (свыше 20000 Гц), не воспринимаемых человеческим ухом, ультразвуковых волн проходить через большие толщины металла, отражаясь от поверхности раздела двух сред (металл-дефект), рис. 4.48.

Ультразвук вводят в изделие под углом к поверхности металла. При встрече с дефектом ультразвуковая волна отражается и фиксирует на экране осциллографа наличие дефекта.

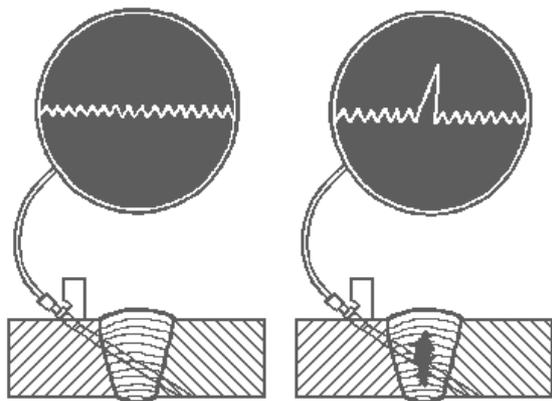


Рис. 4.48. Ультразвуковой контроль

Промышленные установки позволяют обнаруживать дефект на глубине до 2500 мм. При этом можно выявить трещины, непровары, шлаковые включения размером 1–2 мм².

Ультразвуковой метод, выявляя наличие дефекта и даже место его расположения, не позволяет установить его вид.

4.15. Технологические особенности сварки различных металлов и сплавов

Любое соединение, в том числе и сварное, ведёт к ухудшению свойств по сравнению с основным однородным, цельным материалом. Сварное соединение состоит из трёх зон (рис. 4.49): зоны шва 1, зоны термического влияния 2 и зоны основного металла 3.

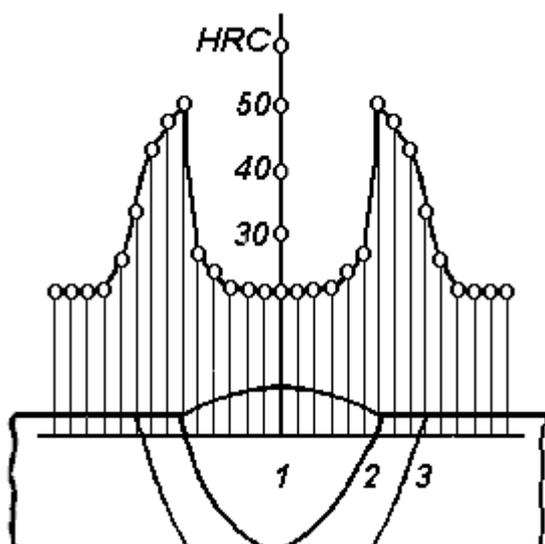


Рис. 4.49. Распределение твёрдости по сечению сварного соединения из закаливающейся стали

Каждая из зон имеет три параметра измерения: ширину, длину, толщину. При некоторых способах сварки, например, при контактной сварке, один из параметров зоны шва может иметь размер, близкий к нулю. На рис. 5.49 видно, что каждая из зон сварного соединения имеет разную твёрдость и, следовательно, пластичность. Эта разнородность приводит к снижению эксплуатационных характеристик изделия.

4.15.1. Понятие свариваемости

Под *свариваемостью* понимается способность металла образовывать при сварке тем или иным способом

сварное соединение, удовлетворяющее установленным техническим требованиям.

На свариваемость сталей главное влияние оказывает углерод и легирующие элементы. Чем больше содержание углерода в стали, тем ниже свариваемость. Легирующие элементы влияют на свариваемость по-разному, поэтому их влияние оценивается по *числовому эквиваленту* к углероду $C_{\text{ЭКВ}}$. Величиной этого суммарного эквивалента оценивают свариваемость стали:

$$C_{\text{ЭКВ}} = C + \text{Mn}/20 + \text{Ni}/15 + \text{Cr}/10 + \text{Mo}/10 + \text{V}/10, \%$$

(Здесь C, Mn, Ni, Cr, Mo, V – процентное содержание элементов в стали.)

По признаку свариваемости все стали можно условно разделить на четыре группы:

1. **Хорошо сваривающиеся стали**, у которых $C_{\text{ЭКВ}}$ не более 0,25. Эти стали не дают трещин при сварке, не требуют подогрева и термической обработки.

2. **Удовлетворительно сваривающиеся стали**, $C_{\text{ЭКВ}}$ в пределах 0,25–0,35; они обеспечивают сварку без трещин только в нормальных производственных условиях, т. е. при температуре не ниже 0 °С и без ветра, иначе они требуют подогрева при сварке.

3. **Ограниченно сваривающиеся стали**, у которых $C_{\text{ЭКВ}}$ в пределах 0,35–0,45. При сварке таких сталей требуется предварительный подогрев.

4. **Плохо сваривающиеся стали**, у которых $C_{\text{ЭКВ}}$ выше 0,45. Такие стали можно сваривать с применением предварительного, сопутствующего и последующего подогрева:

Эквивалент углерода $C_{\text{ЭКВ}}$, %	0,5	0,60	0,62	0,74	0,85
Температура подогрева, °С	100	125	150	175	200

Высоколегированные стали при сварке нагревают до 300 °С и выше.

По эквиваленту углерода оценивают свариваемость предварительно и приближённо. Более точные данные о свариваемости получают по следующим показателям:

1. Склонность металла шва к образованию горячих и холодных трещин.

2. Склонность к изменению структуры в околошовной зоне и к образованию закалочных структур.

3. Физико-механические свойства сварного соединения и соответствие их требованиям условий эксплуатации.

Полные и точные данные о свариваемости получают путем проведения технологических испытаний (проб) и окончательные сведения о свариваемости получают из поведения изделия при эксплуатации.

Предварительные представления о свариваемости легированных сталей даёт классификация сталей по структуре в нормализованном состоянии (перлитные, ферритные, мартенситные, аустенитные, карбидные стали).

4.15.2. Влияние углерода и легирующих элементов на свариваемость

Стали с содержанием *углерода* до 0,35 % свариваются хорошо, а далее, с повышением содержания углерода, свариваемость снижается из-за появления в околошовной зоне закалочных структур и газовых пор вследствие выгорания углерода.

Марганец содержится обычно в стали в количестве от 0,3 до 0,8 % и не затрудняет сварку, при повышении содержания Mn более 1 % образуются трещины, требуется подогрев. При сварке стали Гатфильда Г13 (с 13 % марганца) сварка стали становится проблемой из-за образования мартенсита и трещин.

Кремний содержится в обычной углеродистой стали в количестве от 0,02 до 0,3 % и не влияет на свариваемость. При 0,8–1,5 % кремний затрудняет сварку, так как придает стали жидкотекучесть и образует тугоплавкие окислы и сплавы.

Сера является вредной примесью и ухудшает свариваемость, вызывая появление горячих трещин.

Фосфор является вредной примесью и ухудшает свариваемость, так как образует хрупкое фосфористое железо, которое придает стали хладноломкость.

Хром – самый распространённый легирующий элемент – повышает прочность, твёрдость, закаливаемость и устойчивость против коррозии, но ухудшает свариваемость.

Никель повышает прочность и пластичность, улучшает свариваемость, но при сварке требуется защита от кислорода воздуха во избежание выгорания никеля.

Медь в количестве до 0,5 % входит в состав ряда низколегированных сталей, в том числе строительных природнолегированных. Не ухудшает свариваемость.

Ванадий придает стали прочность, вязкость, упругость, ухудшает сварку, так как способствует образованию закалочных структур.

Молибден повышает ударную вязкость и жаропрочность. Сварка затруднена из-за образования трещин.

Титан повышает ударную вязкость, жаропрочность, улучшает свариваемость, способствует измельчению зерна, энергичный раскислитель. Связывает углерод, препятствуя образованию карбидов хрома по границам зёрен и возникновению межкристаллитной коррозии.

Ниобий связывает углерод, как и титан, препятствует образованию карбидов хрома и обеднению аустенита углеродом в кислотостойких сталях, тем самым улучшает свариваемость.

Алюминий является сильным раскислителем, но может одновременно вызвать окисление углерода, что приводит к образованию пор в шве. В небольших количествах свариваемость не ухудшает.

Бор повышает жаростойкость, прокаливаемость, теплоустойчивость сталей. В небольших количествах на свариваемость влияет умеренно.

Кобальт повышает теплоустойчивость и в небольших количествах свариваемость не ухудшает.

Вольфрам повышает твёрдость и снижает свариваемость.

4.15.3. Сварка углеродистых сталей

Сварка *низкоуглеродистых сталей* не вызывает никаких затруднений – хорошо свариваются всеми способами.

Среднеуглеродистые стали (С от 0,26 до 0,45 %) свариваются проволокой с пониженным содержанием углерода (С = 0,08 %), на небольшом токе и с небольшим проваром с целью уменьшения доли основного металла в шве. (Полезна разделка кромок.)

Высокоуглеродистые стали (С > 0,46 %), как правило, не применяют для изготовления сварных конструкций. Необходимость их сварки возникает при ремонтных работах и наплавке. Необходим предварительный, сопутствующий и последующий подогрев, как для плохо сваривающихся сталей.

4.15.4. Сварка легированных сталей

Сварка *низколегированных сталей* (стали перлитного класса) с содержанием легирующих элементов в сумме не более 0,25 %, при содержании углерода не более 0,15 %. Эти стали широко применяются в строительстве для изготовления ответственных и облегчённых конструкций. Все эти стали относятся к категории удовлетворительно сваривающихся.

Для сварки конструкций промышленных и гражданских сооружений применяют стали 15ХСНД, 14Г2, 09Г2С, 10Г2С1, 16ГС и др. Для изготовления арматуры железобетонных конструкций и сварных газопроводных труб применяют стали 18Г2С, 25Г2С, 35ГС, 20ХГ2Ц (Ц – цирконий, содержание 0,14 %).

Стали 09Г2С и 10Г2С1 хорошо свариваются всеми способами. При сварке стали типа 15ХСНД возможно образование закалочных структур и даже трещин в зоне шва. Кроме того, выгорание углерода, как правило, вызывает образование пор в металле шва. Ручную дуговую сварку лучше выполнять электродами с покрытием на фтористо-кальциевой основе (например, марка УОНИ). Автоматическую сварку производят проволокой Св08А или Св08ГА под флюсом АН-348А или ОСЦ-45. Сварку листов до 40 мм можно производить без разделки кромок. При этом равнопрочность сварного

соединения обеспечивается переходом легирующих элементов из электродной проволоки в металл шва.

В зимних условиях сварку конструкций из сталей типа 15ХСНД разрешается производить только при температурах не ниже $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. При более низких температурах изделия подвергаются предварительному нагреву в зоне сварки на ширине 100–120 мм по обе стороны шва до 100–150 $^{\circ}\text{C}$. При температуре $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ сварка не допускается. Электрошлаковая сварка сталей любой толщины производится проволокой Св10Г2 под флюсом АН-8 при любой температуре окружающего воздуха.

Сварка *среднелегированных сталей* (перлитного класса). Сюда относятся теплоустойчивые стали типа 15ХМ, 20ХМ, 15Х1М1Ф. При сварке возможно образование мелких трещин в околошовной зоне. Применяются электроды с проволокой той же марки, что и свариваемая сталь, покрытие – фтористо-кальциевое. Рекомендуется подогрев и отпуск после сварки.

Сварка *среднелегированных высокопрочных сталей (хромансильей)*. Это стали перлитного класса типа 25ХГС, 30ХГС, 35ХГС, 35ХГСА. Склонны к подкалке и трещинообразованию при сварке. Ручная сварка производится электродами с фтористо-кальциевым покрытием, сварочная проволока Св-08А. Может быть также рекомендована нержавеющая сварочная проволока с повышенным содержанием никеля типа Св-10Х16Н45М6. Сварку надо вести как можно более короткой дугой с подогревом. Если требуется по техническим условиям, изделие подвергают закалке и отпуску.

Сварка *высокохромистых сталей* (более 12 % хрома). При охлаждении на воздухе дают ферритную, феррито-мартенситную или мартенситную структуры. Характеризуются плохой свариваемостью. Сварка рекомендуется при возможно меньшем тепловложении, надо применять пониженный ток и валики малого сечения для ускорения охлаждения при сварке сталей ферритного класса (15Х25Т, 15Х28). Отжигать после сварки при 800–900 $^{\circ}\text{C}$ для растворения хрупких фаз с последующим быстрым охлаждением.

Мартенситные нержавеющие стали типа 30Х13, 40Х13 при сварке закаливаются, поэтому требуют предварительного, сопутствующего подогрева и последующей термической обработки (закалка и отпуск).

Сварка *аустенитных хромоникелевых сталей*. Введение в хромистую сталь 18 % Cr и 9 % Ni переводит её из ферритного класса в аустенитный. При сварке возможно выпадение карбидов хрома по границам зёрен при продолжительном пребывании металла в зоне температур 500–800 $^{\circ}\text{C}$ и возникновение склонности к межкристаллитной коррозии. Для предотвращения этого явления необходимо сварку вести на малых токах (с малым тепловложением), применять охлаждающие медные подкладки и охлаждение водой. С целью исключения образования карбидов хрома в сталь вводят сильные карбидообразователи (титан, ниобий). Закалка после сварки с тем-

пературы 1050 °С фиксирует структуру аустенита (при нагреве карбиды хрома растворяются в аустените).

Сварка *высокомарганцовистых сталей* типа Г13. Содержание Mn 13 %. Структура стали – марганцовистый аустенит. При сварке требуется малое тепловложение и быстрое охлаждение водой. Это предотвращает распад аустенита с образованием мартенсита. Электродуговую сварку производят электродами на фтористо- кальциевой основе, проволока типа Х18Н9. Газовая сварка не рекомендуется из-за большого тепловложения.

Сварка *сталей карбидного класса*. Это высоколегированные быстрорежущие стали типа Р18 и её заменители типа Р6М5. Характеризуются плохой свариваемостью. Широкое применение нашла электроконтактная сварка и сварка трением в инструментальном производстве для изготовления свёрл, фрез и т. п. Режущая часть инструмента изготавливается из быстрорежущей стали, хвостовая – из стали 45. Заготовки диаметром до 30–40 мм предпочтительно сваривать трением, а заготовки большего диаметра – электроконтактной сваркой. Сразу после сварки необходим отжиг. Другие способы сварки не находят применения.

4.15.5. Сварка чугуна

Чугун – это сплав железа с углеродом (более 2,14 % С). От стали чугун отличается очень высокой жидкотекучестью и хрупкостью. Это один из лучших литейных сплавов.

Чугун обладает плохой свариваемостью по следующим причинам:

1. В сварном соединении при быстром охлаждении происходит *отбел* (т. е. появление белого чугуна, отличающегося высокой твёрдостью и хрупкостью, склонного к образованию трещин).

2. Интенсивное выгорание углерода при сварке ведет к образованию газовых пор.

3. Высокая жидкотекучесть (ценится только в литейном деле) требует специальных мер при сварке, вплоть до формовки участка сварки.

Технология сварки чугуна и выбор сварочных материалов базируются на структурной диаграмме (С–Si) и на графике зависимости скорости охлаждения от химического состава чугуна (С и Si).

Сварка чугуна применяется, как правило, в двух случаях: при заварке литейных раковин и при ремонте (заварке трещин и т. п.).

Существует много способов сварки чугуна и сварочных материалов. Ответственные изделия можно сваривать ручной дуговой сваркой на переменном токе электродом из проволоки Св-08 с рутиловым или с меловым покрытием даже без подогрева. Качество зависит от квалификации сварщика.

Однако самое высокое качество и однородность структуры обеспечивает газовая сварка чугунными прутками с подогревом до 600–700 °С (лучше в термосе) и медленным охлаждением после сварки.

Чугунные прутки выплавляются диаметром 4, 6, 8, 10 мм с содержанием кремния до 3–3,5 % для газовой сварки и с покрытием (мел, графит, рутил и др.) – для дуговой сварки.

Для холодной сварки чугуна количество кремния в электроде увеличивается до 4–4,5 %.

4.15.6. Сварка алюминия и его сплавов

Сварка алюминия затруднена наличием тугоплавкой плёнки оксида Al_2O_3 с $t_{пл} = 2050$ °С. Алюминий плавится при 657 °С. Поэтому алюминий, в отличие от стали, переходит из твёрдого состояния в жидкое, не меняя цвета, т. е. сварка не контролируется визуально.

Алюминий и его сплавы с марганцем и магнием хорошо свариваются аргоно-дуговой, а также газовой сваркой. Дуговая сварка покрытыми электродами применяется ограниченно для заварки дефектов литья и трещин в неотвечественных деталях.

Сварка дуралюмина дает низкое качество из-за образования хрупких структур в сварном соединении.

4.15.7. Сварка меди и медных сплавов

Медь и её сплавы обладают низкой свариваемостью. Сварка меди осложняется её способностью в жидком состоянии растворять кислород и водород. Кислород приводит к потере прочности из-за образования легкоплавкой эвтектики Cu_2O-Cu ($t_{пл} = 1064$ °С), располагающейся по границам зёрен (температура плавления меди 1084 °С). Водород приводит к образованию газовых пор в шве. Свариваемость меди также затруднена из-за высокой теплопроводности.

Применяются различные способы сварки меди, в том числе газовая сварка с применением флюса (бура $Na_2B_4O_7$, борная кислота H_3BO_3 и борный ангидрид B_2O_3), дуговая сварка покрытым электродом. Лучшие результаты обеспечивает сварка меди и её сплавов в среде защитных газов: в аргоне, азоте. Азот для меди, в отличие от стали, не является вредным газом.

4.15.8. Сварка титана и его сплавов

Титан – металл будущего – обладает комплексом ценных физико-химических свойств. Он лёгок, почти как алюминий, прочен, как сталь, благороден, как золото. Его сварка осложняется высокой его активностью при нагреве в среде кислорода, водорода, азота, углерода. При этом титан все свои ценные свойства (прочность, коррозионную стойкость) теряет и становится хрупким.

Титан и его сплавы хорошо свариваются аргоно-дуговой сваркой, но требуют при этом тщательной газовой защиты, в том числе дополнительной защиты корня шва.