

Рис. 5.1. Схемы дуговой сварки

(рис. 5.1, а), при которой соединение выполняется путем расплавления только основного металла 3 либо с применением присадочного металла 4; сварка *плавящимся* (металлическим) электродом 1 дугой прямого действия 2 (рис. 5.1, б) с одновременным расплавлением основного металла 3 и электрода, который пополняет сварочную ванну жидким металлом; сварка *косвенной дугой* 5 (рис. 5.1, в), горящей между двумя, как правило, неплавящимися электродами 1; при этом основной металл 3 нагревается и расплавляется теплотой столба дуги; сварка *трехфазной дугой* 6 (рис. 5.1, г), при которой дуга горит между электродами 1, а также между каждым электродом и основным металлом 3. Питание дуги осуществляется постоянным или переменным током. При применении постоянного тока различают сварку на прямой и обратной полярностях. В первом случае электрод подключают к отрицательному полюсу (катод), во втором — к положительному (анод).

Кроме того, различные способы дуговой сварки классифицируют также по способу защиты дуги и расплавленного металла и степени механизации процесса.

## 2. ПОНЯТИЕ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГЕ И ЕЕ СВОЙСТВА

*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 ее горения. Процесс зажигания дуги в большинстве случаев включает три этапа: короткое замыкание электрода на заготовку, отвод электрода на расстояние 3—6 мм и возникновение устойчивого дугового разряда. Короткое замыкание

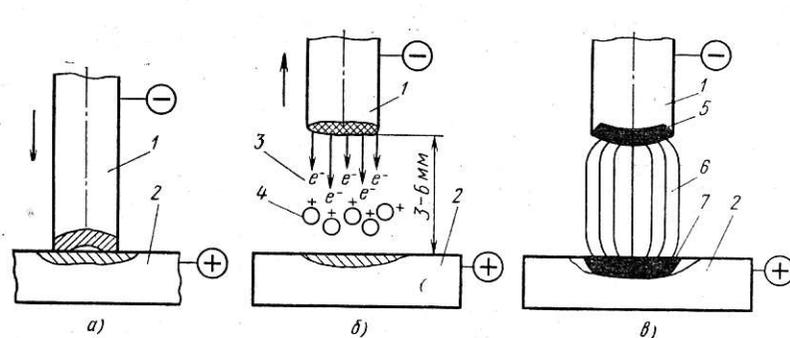


Рис. 5.2. Схема процесса зажигания дуги

(рис. 5.2, а) выполняется для разогрева торца электрода 1 и заготовки 2 в зоне контакта с электродом. После отвода электрода (рис. 5.2, б) с его разогретого торца (катода) под действием электрического поля начинается термоэлектронная эмиссия электронов 3. Столкновение быстро движущихся по направлению к аноду электронов с молекулами газов и паров металла приводит к их ионизации 4. По мере разогрева столба дуги и повышения кинетической энергии атомов и молекул происходит дополнительная ионизация за счет их соударения. Отдельные атомы также ионизируются в результате поглощения энергии, выделяемой при соударении других частиц. В результате дуговой промежуток становится электропроводным и через него начинается разряд электричества. Процесс зажигания дуги заканчивается возникновением устойчивого дугового разряда (рис. 5.2, в).

Возможно зажигание дуги без короткого замыкания и отвода электрода с помощью высокочастотного электрического разряда через дуговой промежуток, обеспечивающего его первоначальную ионизацию. Для этого в сварочную цепь на короткое время подключают источник высокочастотного переменного тока высокого напряжения (осциллятор). Этот способ применяют для зажигания дуги при сварке неплавящимся электродом.

Температура столба дуги 6 зависит от материала электрода и состава газов в дуге, а температура катодного 5 и анодного 7 пятен приближается к температуре кипения металла электродов. Эти температуры для дуги покрытого стального электрода составляют соответственно ~6000 и ~3000 К. При этом в анодной области дуги, как правило, выделяется значительно больше тепловой энергии, чем в катодной.

*Полная тепловая мощность дуги, Дж/с*

$$Q = KI_{св}U_{д},$$

где  $K$  — коэффициент несинусоидальности напряжения и тока (для постоянного тока равен единице, для переменного тока 0,7—0,97);  $I_{св}$  — сварочный ток, А;  $U_{д}$  — напряжение дуги, В.

Однако не вся мощность дуги полностью расходуется на нагрев и расплавление электрода и основного металла, часть ее теряется

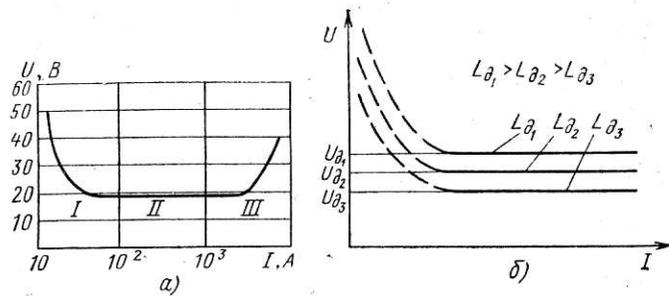


Рис. 5.3. Статическая вольт-амперная характеристика дуги (а) и зависимость напряжения дуги  $U_d$  от ее длины  $L_d$  (б)

в результате теплоотдачи в окружающую среду. Часть мощности дуги, расходуемая на нагрев заготовки, называется *эффективной тепловой мощностью сварочной дуги*, Дж/с:

$$q = \eta Q,$$

где  $\eta$  — КПД дуги, представляющий собой отношение эффективной мощности дуги к полной; величина  $\mu$  зависит от способа сварки, вида и состава сварочных материалов (для автоматической сварки под флюсом, электрошлаковой, ручной дуговой покрытым электродом и сварки в защитных газах среднее значение соответственно равно 0,9; 0,7; 0,8 и 0,6).

Для оценки затрат тепловой энергии на образование единицы длины шва или единицы площади соединения при однопроходной сварке используют величины *погонной*  $q/v_{св}$  и *удельной погонной энергии*  $q/v_{св}\delta$  ( $v_{св}$  — скорость сварки, см/с;  $\delta$  — толщина заготовки, см).

Электрические свойства дуги описываются *статической вольт-амперной характеристикой*, представляющей собой зависимость между напряжением и током в состоянии устойчивого горения (рис. 5.3, а). Характеристика состоит из трех участков: I — характеристика падающая, II — жесткая, III — возрастающая. Самое широкое применение нашла дуга с жесткой и возрастающей характеристиками. Дуга с падающей характеристикой малоустойчива и имеет ограниченное применение. В последнем случае для поддержания горения дуги необходимо постоянное включение в сварочную цепь осциллятора. Каждому участку характеристики дуги соответствует определенный характер переноса расплавленного электродного металла в сварочную ванну: I и II — крупнокапельный, III — мелкокапельный или струйный.

Для дуги с жесткой характеристикой напряжение  $U_d$  пропорционально ее длине:

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

где  $L_d$  — длина дуги ( $0 < L_d \leq 8$  мм);  $\alpha$  и  $\beta$  — опытные коэффициенты, зависящие от рода металла и газа в дуговом промежутке и других факторов (для стальных электродов  $\alpha = 10$  В;  $\beta = 2$  В/мм).

Из приведенной зависимости следует, что для сохранения напряжения дуги неизменным необходимо длину дуги поддерживать постоянной (рис. 5.3, б).

В дальнейшем рассмотрена главным образом дуга с жесткой характеристикой как наиболее распространенная при сварке.

### 3. ИСТОЧНИКИ СВАРОЧНОГО ТОКА

Источники тока для питания сварочной дуги должны иметь специальную внешнюю характеристику. *Внешней характеристикой источника* называется зависимость напряжения на его выходных клеммах от тока в электрической цепи. Внешние характеристики могут быть следующих основных видов: падающая 1, пологопадающая 2, жесткая 3 и возрастающая 4 (рис. 5.4, а). Источник тока выбирают в зависимости от вольт-амперной характеристики дуги, соответствующей принятому способу сварки.

Для питания дуги с жесткой характеристикой применяют источники с падающей или пологопадающей внешней характеристикой (ручная дуговая сварка, автоматическая под флюсом, сварка в защитных газах неплавящимся электродом). Режим горения дуги определяется точкой пересечения характеристик дуги б и источника тока I (рис. 5.4, б). Точка С соответствует режиму устойчивого горения дуги, точка А — режиму холостого хода в работе источника тока в период, когда дуга не горит и сварочная цепь разомкнута. Режим холостого хода характеризуется повышенным напряжением (60—80 В). Точка D соответствует режиму короткого замыкания при зажигании дуги и ее замыкании каплями жидкого электродного металла. Короткое замыкание характеризуется малым напряжением, стремящимся к нулю, и повышенным, но ограниченным током.

Источники сварочного тока с падающей характеристикой необходимы для облегчения зажигания дуги за счет повышенного напряжения холостого хода, обеспечения устойчивого горения дуги и практически постоянной проплавливающей способности дуги, так как колебания ее длины и напряжения (особенно значительные при ручной сварке) не приводят к значительным изменениям сварочного

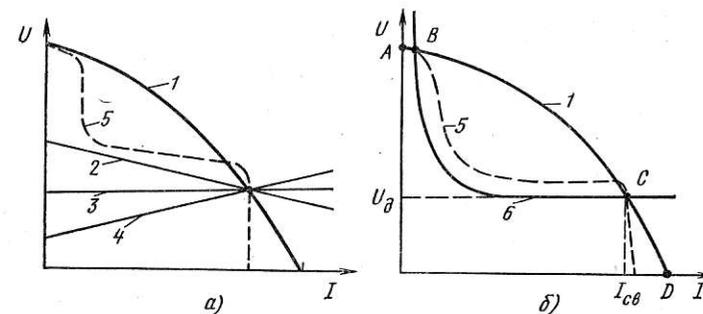


Рис. 5.4. Внешние характеристики источников сварочного тока (а) и соотношение характеристик дуги и падающей характеристики источника тока при сварке (б)

тока, а также для ограничения тока короткого замыкания, чтобы не допустить перегрева токоподводящих проводов и источников тока. Наилучшим образом приведенным требованиям удовлетворяет источник тока с идеализированной внешней характеристикой 5 (рис. 5.4).

Для обеспечения устойчивости горения дуги с возрастающей характеристикой применяют источники сварочного тока с жесткой или возрастающей характеристикой (сварка в защитных газах плавящимся электродом и автоматическая под флюсом током повышенной плотности).

Для питания сварочной дуги применяют источники переменного тока (сварочные трансформаторы) и источники постоянного тока (сварочные выпрямители и генераторы). Источники переменного тока более распространены, так как обладают рядом технико-экономических преимуществ. Сварочные трансформаторы проще в эксплуатации, значительно долговечнее и обладают более высоким КПД, чем выпрямители и генераторы постоянного тока. Однако в некоторых случаях (сварка на малых токах покрытыми электродами и под флюсом) при питании переменным током 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. Постоянный ток предпочтителен в технологическом отношении: при его применении повышается устойчивость горения дуги, улучшаются условия сварки в различных пространственных положениях, появляется возможность вести сварку на прямой и обратной полярностях и т. д. Последнее вследствие большего тепловыделения в анодной области дуги позволяет проводить сварку сварочными материалами с тугоплавкими покрытиями и флюсами.

Сварочные трансформаторы, как правило, имеют падающую внешнюю характеристику, их используют для дуговой ручной сварки и автоматической сварки под флюсом. Широко применяют трансформаторы с увеличенным магнитным рассеянием и подвижной вторичной обмоткой (типов ТС и ТД). В этих трансформаторах (рис. 5.5, а) первичная 1 и вторичная 2 обмотки раздвинуты относительно друг друга, что обуславливает их повышенное индуктивное сопротивление вследствие появления магнитных потоков рассеяния.

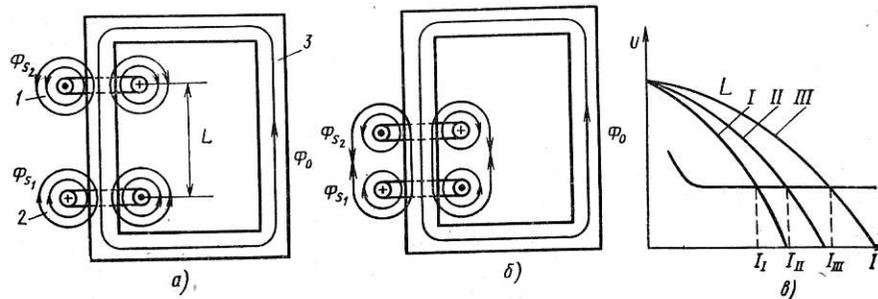


Рис. 5.5. Схема сварочных трансформаторов типов ТС и ТД: а — положение обмоток при малом токе; б — то же, при большом токе; в — внешние характеристики трансформаторов

При работе трансформатора основной магнитный поток  $\Phi_0$ , создаваемый первичной и вторичной обмотками, замыкается через магнитопровод 3. Часть магнитного потока ответвляется и замыкается вокруг обмоток через воздушное пространство, образуя потоки рассеяния  $\Phi_{s1}$  и  $\Phi_{s2}$ . Потоки рассеяния индуцируют в обмотках электродвижущую силу, противоположную основному напряжению. С увеличением сварочного тока увеличиваются потоки рассеяния и, следовательно, возрастает индуктивное сопротивление вторичной обмотки, что и создает внешнюю падающую характеристику трансформатора.

Для плавного регулирования сварочного тока изменяют расстояние между обмотками трансформатора. При сближении обмоток (рис. 5.5, б) происходит частичное взаимное уничтожение противоположно направленных потоков рассеяния  $\Phi_{s1}$  и  $\Phi_{s2}$ , что уменьшает индуктивное сопротивление вторичной обмотки и увеличивает сварочный ток. Минимальный сварочный ток соответствует наибольшему расстоянию между обмотками и максимальным потоком рассеяния (рис. 5.5, в).

Для сварки трехфазной дугой применяют специальные трансформаторы с падающей внешней характеристикой, собранные на основе двух однофазных (типов ТТС и ТТСД); для электрошлаковой сварки — однофазные и трехфазные трансформаторы с жесткой характеристикой (типов ТШП и ТШС).

Сварочные выпрямители состоят из трехфазного понижающего трансформатора 1, выпрямительного блока 2, собранного из кремниевых полупроводниковых вентилях по трехфазной мостовой схеме (рис. 5.6). Падающая внешняя характеристика выпрямителя обеспечивается повышенным индуктивным сопротивлением понижающего трансформатора, у которого первичная и вторичная обмотки раздвинуты и размещены на разных концах магнитопровода (тип ВД). Плавное регулирование тока достигается перемещением подвижной первичной обмотки.

Сварочные выпрямители с трансформатором с нормальным магнитным рассеянием имеют пологопадающие или жесткие внешние характеристики (типов ВС и ВДГ). Их применяют для сварки плавящимся электродом в среде защитных газов.

Выпрямители бесшумны, имеют высокий КПД, удобны в эксплуатации. Они обеспечивают высокую стабильность горения дуги, особенно на малых токах. Для нормальной работы выпрямителей требуется интенсивное охлаждение, так как полупроводники нагреваются при работе. Поэтому выпрямители снабжены вентиляторами. Нагрев полупроводников иногда ограничивает мощность выпрямителей.

Сварочные преобразователи состоят из электродвигателя переменного тока и сварочного генератора постоянного тока. Генераторы в зависимости от конструкции могут иметь различные внешние характеристики. Падающая внешняя характеристика обеспечивается специальной

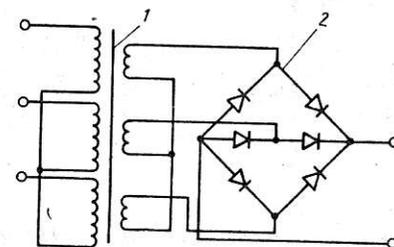


Рис. 5.6. Схема трехфазного выпрямителя

схемой включения обмоток возбуждения либо особой конструкцией полюсов статора и якоря. По сравнению с выпрямителями сварочные преобразователи имеют более низкий КПД и менее удобны в эксплуатации ввиду наличия вращающихся частей. Преобразователи применяют только для ручной и полуавтоматической сварки. Преобразователи эффективны при сварке в монтажных условиях и на открытом воздухе.

**Сварочные агрегаты** состоят из двигателя внутреннего сгорания и сварочного генератора постоянного тока. Агрегаты монтируют на подвижных платформах и используют в монтажных и полевых условиях для ручной сварки.

#### 4. РУЧНАЯ ДУГОВАЯ СВАРКА

Ручную дуговую сварку выполняют сварочными электродами, которые вручную подают в дугу и перемещают вдоль заготовки. В процессе сварки металлическим покрытым электродом (рис. 5.7) дуга 8 горит между стержнем электрода 7 и основным металлом 1. Стержень электрода плавится, и расплавленный металл каплями стекает в металлическую ванну 9. Вместе со стержнем плавится покрытие электрода 6, образуя газовую защитную атмосферу 5 вокруг дуги и жидкую шлаковую ванну 4 на поверхности расплавленного металла. Металлическая и шлаковая ванны вместе образуют сварочную ванну. По мере движения дуги сварочная ванна затвердевает и формируется сварной шов 3. Жидкий шлак после остывания образует твердую шлаковую корку 2.

В перегретой сварочной ванне протекает ряд металлургических процессов: испарение или окисление (выгорание) некоторых легирующих элементов, например углерода, марганца, кремния, хрома и др., и насыщение расплавленного металла кислородом, азотом и водородом из окружающего воздуха. В результате возможно изменение состава сварного шва по сравнению с электродным и основным металлом, а также понижение его механических свойств, особенно вследствие насыщения шва кислородом. Для обеспечения заданного состава и свойств шва в покрытие вводят легирующие элементы и элементы-раскислители.

Кристаллизация сварного шва начинается от границ оплавленного основного металла и протекает путем роста столбчатых кристаллитов к центру шва. При этом оси кристаллита, как правило, остаются перпендикулярными к поверхности движущейся сварочной ванны, в результате чего кристаллиты изгибаются и вытягиваются в направлении сварки (рис. 5.8). Вследствие дендритной ликвации примеси располагаются по границам кристаллитов, где они могут образовать легкоплавкие эвтектики и неметаллические включения. Это снижает механические свойства шва и в отдельных случаях может быть причиной образования горячих трещин.

**Электроды для ручной сварки** представляют собой стержни с нанесенными на них покрытиями. Стержень изготавливают из сварочной проволоки повышенного качества. Стандарт на стальную

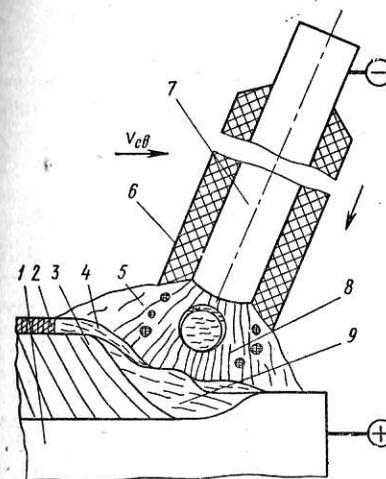
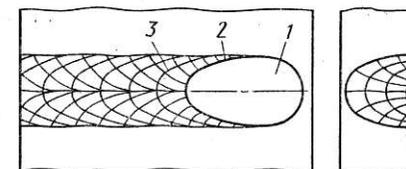


Рис. 5.7. Схема процесса сварки металлическим покрытым электродом

Рис. 5.8. Столбчатые кристаллиты в сварном шве:

1 — сварочная ванна; 2 — изотерма кристаллизации шва; 3 — столбчатый кристаллит



сварочную проволоку предусматривает 77 марок проволоки диаметром 0,2—12 мм. Сварочную проволоку всех марок в зависимости от состава разделяют на три группы: низкоуглеродистую (Св-08А, Св-08ГС и др.), легированную (Св-18ХМА; Св-10Х5М и др.) и высоколегированную (Св-06Х19Н10МЗТ; Св-07Х25Н13 и др.). В марках проволоки «Св» означает слово «сварочная», буквы и цифры — ее марочный состав.

Сварочную проволоку используют также при автоматической дуговой сварке под флюсом, сварке плавящимся электродом в среде защитных газов и как присадочный материал при дуговой сварке неплавящимся электродом и газовой сварке. Покрытия электродов предназначены для обеспечения стабильного горения дуги, защиты расплавленного металла от воздействия воздуха и получения металла шва заданного состава и свойств. В состав покрытия электродов входят стабилизирующие, газообразующие, шлакообразующие, раскисляющие, легирующие и связующие составляющие.

Электроды классифицируют по назначению и виду покрытия. По назначению стальные электроды подразделяют на пять классов: для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с  $\sigma_B \leq 600$  МПа, легированных конструкционных сталей с  $\sigma_B \geq 600$  МПа, легированных жаропрочных сталей, высоколегированных сталей с особыми свойствами и для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами. Электроды для сварки конструкционных сталей делят на типы Э38, Э42, ..., Э150. Цифры в обозначении типа электрода означают  $\sigma_B$  наплавленного металла в  $10^{-1}$  МПа. В обозначении типов электродов для сварки жаропрочных и высоколегированных сталей и наплавочных входит марочный состав наплавленного металла (Э-09МХ, Э-10Х5МФ, Э-08Х20Н9Г2Б, Э-10Х20Н70Г2М2В, Э-120Х12Г2СФ, Э-350Х26Г2Р2СТ и др.).

По виду покрытия электроды делят на электроды с кислым, рутиловым, основным и целлюлозным покрытием.

Кислые покрытия имеют шлаковую основу, состоящую из руд железа и марганца ( $Fe_2O_3$ ,  $MnO$ ), полевого шпата ( $SiO_2$ ), ферромарганца ( $FeMn$ ) и других компонентов. Электроды обладают хорошими сварочно-технологическими свойствами: позволяют вести сварку во всех пространственных положениях на переменном и постоянном токе. Возможна сварка металла с ржавыми кромками и окалиной. Применяют для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Металл шва по составу соответствует кипящей стали. Однако электроды токсичны в связи с выделением соединений марганца, поэтому применение их сокращается.

Рутиловые покрытия состоят из рутилового концентрата ( $TiO_2$ ), полевого шпата, мрамора ( $CaCO_3$ ), ферромарганца и других компонентов. Обладают высокими сварочно-технологическими свойствами. Их применяют для сварки ответственных конструкций из низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Наплавленный металл по составу соответствует полуспокойной стали.

Основные покрытия содержат мрамор, магнезит ( $MgCO_3$ ), плавиковый шпат ( $CaF_2$ ), ферросилиций ( $FeSi$ ), ферромарганец, ферротитан ( $FeTi$ ) и другие компоненты. Сварочно-технологические свойства ограничены. Сварку выполняют, как правило, на постоянном токе обратной полярности, металл шва склонен к образованию пор при наличии ржавчины на свариваемых кромках, требуется высокотемпературная прокалка ( $400-450^\circ C$ ) перед сваркой и т. д. Наплавленный металл хорошо раскислен и по составу соответствует спокойной стали. Возможно дополнительное легирование шва через покрытие. Электроды с основным покрытием применяют для сварки ответственных конструкций из сталей всех классов.

Целлюлозное покрытие содержит целлюлозу и другие органические вещества с небольшим количеством шлакообразующих компонентов. Они создают хорошую газовую защиту и образуют малое количество шлака. Особенно пригодны для сварки на монтаже в любых пространственных положениях на переменном и постоянном токе. Их применяют для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Наплавленный металл по составу соответствует полуспокойной или спокойной стали.

**Режим ручной дуговой сварки.** Основным параметром режима ручной дуговой сварки является сварочный ток ( $A$ ), который выбирают в зависимости от диаметра и типа металла электрода:

$$I_{св} = kd_э,$$

где  $k$  — опытный коэффициент, равный 40—60 для электродов со стержнем из низкоуглеродистой стали и 35—40 для электродов со стержнем из высоколегированной стали,  $A/mm$ ;  $d_э$  — диаметр стержня электрода,  $mm$ .

Диаметр электродов выбирают, исходя из толщины стали  $\delta$ :

$\delta$ , мм . . .	1—2	3—5	4—10	12—24 и более.
$d_э$ , мм . . .	2—3	3—4	4—5	5—6

При толщине стали до 6 мм сваривают по зазору без разделки кромок заготовки. При больших толщинах металла выполняют одностороннюю или двустороннюю разделку кромок под углом  $60^\circ$ . Разделка необходима для обеспечения полного провара по толщине. Металл толщиной свыше 10 мм сваривают многослойным швом. Ручная сварка удобна при выполнении коротких и криволинейных швов в любых пространственных положениях — нижнем, вертикальном, горизонтальном, потолочном (рис. 5.9), при наложении швов в труднодоступных местах, а также при монтажных работах и сборке конструкций сложной формы. Ручная сварка обеспечивает хорошее качество сварных швов, но обладает более низкой производительностью, например, по сравнению с автоматической дуговой сваркой под флюсом.

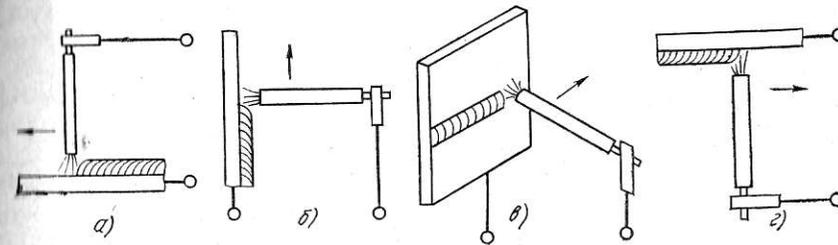


Рис. 5.9. Возможные пространственные положения при ручной сварке: а — нижнее; б — вертикальное; в — горизонтальное; з — потолочное

Производительность процесса в основном определяется сварочным током. Однако ток при ручной сварке покрытыми электродами ограничен, так как повышение тока сверх рекомендованного значения приводит к разогреву стержня электрода, отслаиванию покрытия, сильному разбрызгиванию и угару расплавленного металла. Ручную сварку постепенно заменяют полуавтоматической в атмосфере защитных газов.

## 5. АВТОМАТИЧЕСКАЯ ДУГОВАЯ СВАРКА ПОД ФЛЮСОМ

Для автоматической дуговой сварки под флюсом используют непокрытую электродную проволоку и флюс для защиты дуги и сварочной ванны от воздуха. Подача и перемещение электродной проволоки механизированы. Автоматизированы процессы зажигания дуги и заварки кратера в конце шва.

В процессе автоматической сварки под флюсом (рис. 5.10) дуга 10 горит между проволокой 3 и основным металлом 8. Столб дуги и металлическая ванна жидкого металла 9 со всех сторон плотно закрыты слоем флюса 5 толщиной 30—50 мм. Часть флюса расплавляется, в результате чего вокруг дуги образуется газовая полость, а на поверхности расплавленного металла — ванна жидкого шлака 4.

Для сварки под флюсом характерно глубокое проплавление основного металла. Действие мощной дуги и весьма быстрое движение электрода вдоль заготовки обуславливают оттеснение расплавленного металла в сторону, противоположную направлению сварки. По мере поступательного движения электрода происходит затвердевание металлической и шлаковой ванн с образованием сварного шва 7.

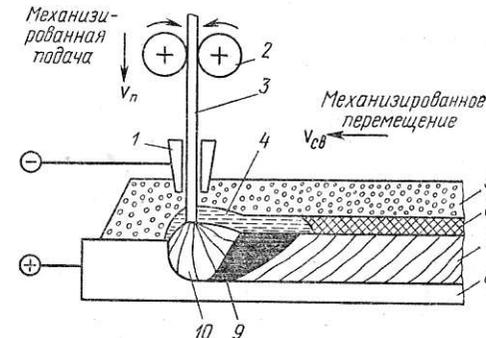


Рис. 5.10. Схема процесса автоматической дуговой сварки под флюсом

покрытого твердой шлаковой коркой 6. Проволоку подают в дугу и перемещают ее вдоль шва с помощью механизмов подачи 2 и перемещения. Ток к электроду поступает через токопровод 1.

Основные преимущества автоматической сварки под флюсом по сравнению с ручной дуговой сваркой состоят в повышении производительности процесса сварки в 5—20 раз, качества сварных соединений и уменьшении себестоимости 1 м сварного шва. Повышение производительности достигается за счет использования больших сварочных токов (до 2000 А) и непрерывности процесса сварки. Применение непокрытой проволоки позволяет приблизить токопровод на расстояния 30—50 мм от дуги и тем самым устранить опасный разогрев электрода при большой силе тока. Плотная флюсовая защита сварочной ванны предотвращает разбрызгивание и угар расплавленного металла. Увеличение силы тока позволяет сваривать металл большой толщины (до 20 мм) за один проход без разделки кромок.

Повышенное качество сварных швов обусловлено получением более высоких механических свойств наплавленного металла благодаря надежной защите сварочной ванны флюсом, интенсивному раскислению и легированию вследствие увеличения объема жидкого шлака, сравнительно медленного охлаждения шва под флюсом и твердой шлаковой коркой; улучшением формы и поверхности сварного шва и постоянством его размеров по всей длине вследствие регулирования режима сварки, механизированной подачи и перемещения электродной проволоки.

Флюсы служат для изоляции сварочной ванны от атмосферы воздуха, обеспечения устойчивого горения дуги, формирования поверхности шва и получения заданных состава и свойств наплавленного металла. Флюсы классифицируют по назначению, химическому составу и способу изготовления. По назначению они разделяются на флюсы для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей, легированных и высоколегированных сталей.

Флюсы для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей предназначены для раскисления шва и легирования его марганцем и кремнием. Для этого применяют плавленые высококремнистые марганцевые флюсы. Их шлаки имеют высокое содержание  $\text{SiO}_2$  и  $\text{MnO}$ . Флюсы готовят путем сплавления марганцевой руды, кремнезема, плавикового шпата в электропечах.

Флюсы для сварки легированных и высоколегированных сталей должны обеспечивать минимальное окисление легирующих элементов в шве. Для этого применяют плавленые и керамические низкокремнистые, бескремнистые и фторидные флюсы. Их шлаки имеют высокое содержание  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaF}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Плавленые флюсы изготавливают из плавикового шпата, алюмосиликатов, алюминатов, путем сплавления в электропечах. Их шлаки имеют основной характер. Керамические флюсы готовят из порошкообразных компонентов путем замеса их на жидком стекле, гранулирования и последующего прокаливания. Основу керамических флюсов составляет мрамор, плавиковый шпат и хлориды щелочноземельных металлов. В них также входят ферросплавы сильных раскислителей (кремния, титана, алюминия) и легирующих элементов и чистые металлы. Шлаки керамических флюсов имеют основной или пассивный характер и обеспечивают получение в металле шва заданное содержание легирующих элементов.

Дуговую сварку под флюсом выполняют сварочными автоматами: сварочными головками или самоходными тракторами, перемеща-

ющимися непосредственно по изделию. Назначение сварочных автоматов — подача электродной проволоки в дугу и поддержание постоянного режима сварки в течение всего процесса. Автоматическую сварку под флюсом применяют в серийном и массовом производствах для выполнения длинных прямолинейных и кольцевых швов в нижнем положении на металле толщиной 2—100 мм. Под флюсом сваривают стали различных классов. Автоматическую сварку широко применяют при изготовлении котлов, резервуаров для хранения жидкостей и газов, корпусов судов, мостовых балок и других изделий. Она является одним из основных звеньев автоматических линий для изготовления сварных автомобильных колес и станов для производства сварных прямошовных и спиральных труб.

## 6. ДУГОВАЯ СВАРКА В ЗАЩИТНОМ ГАЗЕ

При сварке в защитном газе электрод, зона дуги и сварочная ванна защищены струей защитного газа.

В качестве защитных газов применяют инертные газы (аргон и гелий) и активные газы (углекислый газ, азот, водород и др.), иногда — смеси двух газов или более. В нашей стране наиболее распространено применение аргона  $\text{Ar}$  и углекислого газа  $\text{CO}_2$ .

Аргон — бесцветный газ, в 1,38 раза тяжелее воздуха, нерастворим в жидких и твердых металлах. Аргон выпускают высшего и первого сортов, имеющих соответственно чистоту 99,992 и 99,987 %. Поставляют и хранят аргон в стальных баллонах в сжатом газообразном состоянии под давлением 15 МПа.

Углекислый газ бесцветный, со слабым запахом, в 1,52 раза тяжелее воздуха, нерастворим в твердых и жидких металлах. Выпускают углекислый газ сварочный, пищевой и технический, имеющие соответственно чистоту 99,5, 98,5 и 98,0 %. Для сварки газ поставляют и хранят в стальных баллонах в сжиженном состоянии под давлением 7 МПа.

Аргонодуговой сваркой можно сваривать неплавящимся и плавящимся электродами. Сварку неплавящимся электродом применяют, как правило, при соединении металла толщиной 0,5—6 мм; плавящимся электродом — от 1,5 мм и более. В аргоне неплавящимся вольфрамовым электродом ( $T_{\text{пл}} = 3370^\circ\text{C}$ ) можно сваривать с расплавлением только основного металла (толщиной до 3 мм), а при необходимости получения усиления шва или заполнения разделки кромок (толщина более 3 мм) — и присадочного материала (прутка или проволоки). Последний подают в дугу вручную (рис. 5.11, а) или механизмом подачи (рис. 5.11, б).

Сварку неплавящимся электродом ведут на постоянном токе прямой полярности. В этом случае дуга легко зажигается и горит устойчиво при напряжении 10—15 В. При обратной полярности возрастает напряжение дуги, уменьшается устойчивость ее горения и снижается стойкость электрода. Эти особенности дуги обратной полярности делают ее непригодной для непосредственного применения в сварочном процессе. Однако дуга обратной полярности обладает одним важным технологическим свойством: при ее действии с поверхности свариваемого металла удаляются оксиды. Одно из объяснений этого явления заключается в том, что поверхность металла бомбарди-

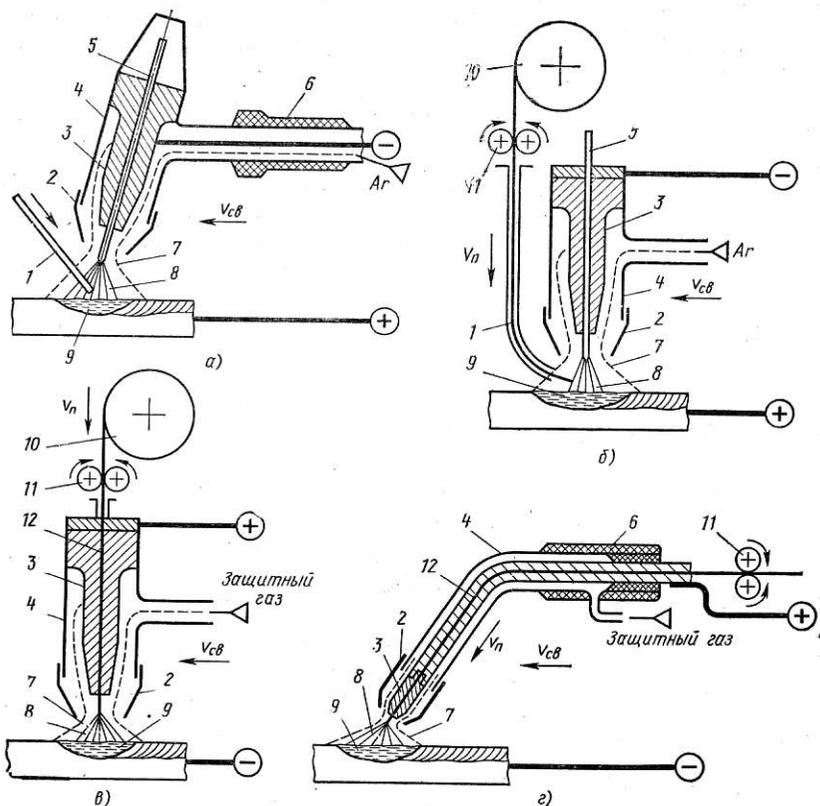


Рис. 5.11. Виды сварки в защитных газах:

1 — присадочный пруток или проволока; 2 — сопло; 3 — токоподводящий мундштук; 4 — корпус горелки; 5 — неплавящийся вольфрамовый электрод; 6 — рукоять горелки; 7 — атмосфера защитного газа; 8 — сварочная дуга; 9 — ванна расплавленного металла; 10 — кассета с проволокой; 11 — механизм подачи; 12 — плавящийся металлический электрод (сварочная проволока)

руется тяжелыми положительными ионами аргона, которые механически разрушают пленки оксидов. Процесс удаления оксидов также известен как катодное распыление. Указанные свойства дуги обратной полярности используют при сварке алюминия, магния и их сплавов, применяя для питания дуги переменный ток.

При сварке неплавящимся электродом на переменном токе сочетаются преимущества дуги на прямой и обратной полярностях. Однако асимметрия электрических свойств дуги, обусловленная ее меньшей электрической проводимостью при обратной полярности по сравнению с прямой, приводит к ряду нежелательных явлений. В результате выпрямляющей способности дуги появляется постоянная составляющая тока прямой полярности. В этих условиях дуга горит неустойчиво, ухудшается очистка поверхности сварочной ванны от тугоплавких оксидов и нарушается процесс формирования шва. Поэтому для питания дуги в аргоне переменным током при-

меняют специальные источники тока. В их схему включают стабилизатор горения дуги — электронное устройство, подающее импульс дополнительного напряжения на дугу в полупериод обратной полярности. Таким образом, обеспечивается устойчивость дуги, постоянство тока и процесса формирования шва на обеих полярностях тока.

Сварку в аргоне плавящимся электродом выполняют по схеме, приведенной на рис. 5.11, в, г. Нормальное протекание процесса сварки и хорошее качество шва обеспечиваются при высокой плотности тока (100 А/мм<sup>2</sup> и более). При невысокой плотности тока имеет место крупнокапельный перенос расплавленного металла с электрода в сварочную ванну, приводящий к пористости шва, сильному разбрызгиванию расплавленного металла и малому проплавлению основного металла. При высоких плотностях тока перенос расплавленного металла с электрода становится мелкокапельным или струйным. В условиях действия значительных электромагнитных сил быстро движущиеся мелкие капли сливаются в сплошную струю. Такой перенос электродного металла обеспечивает глубокое проплавление основного металла, формирование плотного шва с ровной и чистой поверхностью и разбрызгивание в допустимых пределах.

В соответствии с необходимостью применения высоких плотностей тока для сварки плавящимся электродом используют проволоку малого диаметра (0,6—3 мм) и большую скорость ее подачи. Такой режим сварки обеспечивается только механизированной подачей проволоки в зону сварки. Сварку выполняют на постоянном токе обратной полярности. В данном случае электрические свойства дуги в значительной степени определяются наличием ионизированных атомов металла электрода в столбе дуги. Поэтому дуга обратной полярности горит устойчиво и обеспечивает нормальное формирование шва, в то же время ей соответствуют повышенная скорость расплавления проволоки и производительность процесса сварки.

Сварку сталей часто выполняют в смеси  $Ar + 5\% O_2$ . Кислород уменьшает поверхностное натяжение расплавленного металла, что способствует снижению критической плотности тока, при которой капельный перенос металла переходит в струйный. Одновременно повышается устойчивость горения дуги при относительно небольших токах, что облегчает сварку металла малой толщины.

Сварку в углекислом газе выполняют только плавящимся электродом на повышенных плотностях постоянного тока обратной полярности (см. рис. 5.11, в, г). Такой режим обусловлен теми же особенностями переноса электродного металла и формирования шва, которые рассмотрены для сварки плавящимся электродом в аргоне.

При применении  $CO_2$  в качестве защитного газа необходимо учитывать некоторые металлургические особенности процесса сварки, связанные с окислительным действием  $CO_2$ . При высоких температурах сварочной дуги  $CO_2$  диссоциирует на оксид углерода  $CO$  и кислород  $O$ , который, если не принять специальных мер, приводит к окислению свариваемого металла и легирующих элементов. Окислительное действие  $O$  нейтрализуется введением в проволоку дополни-

тельного количества раскислителей марганца и кремния. Поэтому для сварки в  $\text{CO}_2$  углеродистых и низколегированных сталей применяют сварочную проволоку с повышенным содержанием этих элементов (Св-08ГС, Св-10Г2С и т. д.). На поверхности шва образуется тонкая шлаковая корка из оксидов раскислителей. Часто применяют смесь  $\text{CO}_2 + 10\% \text{O}_2$ . Кислород играет ту же роль, что и при добавке в аргон.

Сварка в атмосфере защитных газов в зависимости от степени механизации процессов подачи присадочной или сварочной проволоки и перемещения сварочной горелки может быть ручной, полуавтоматической и автоматической.

По сравнению с ручной сваркой покрытыми электродами и автоматической под флюсом сварка в защитных газах имеет следующие преимущества: высокую степень защиты расплавленного металла от воздействия воздуха; отсутствие на поверхности шва при применении аргона оксидов и шлаковых включений; возможность ведения процесса во всех пространственных положениях; возможность визуального наблюдения за процессом формирования шва и его регулирования; более высокую производительность процесса, чем при ручной дуговой сварке; относительно низкую стоимость сварки в углекислом газе.

Области применения сварки в защитных газах охватывают широкий круг материалов и изделий (узлы летательных аппаратов, элементы атомных установок, корпуса и трубопроводы химических аппаратов и т. п.). Аргонодуговую сварку применяют для цветных (алюминия, магния, меди) и тугоплавких (титана, ниобия, ванадия, циркония) металлов и их сплавов, а также легированных и высоколегированных сталей.

В углекислом газе сваривают конструкции из углеродистой и низколегированной сталей (газо- и нефтепроводы, корпуса судов и т. д.). Преимущество полуавтоматической сварки в  $\text{CO}_2$  с точки зрения ее стоимости и производительности часто приводит к замене ею ручной дуговой сварки покрытыми электродами.

## 7. ПЛАЗМЕННАЯ СВАРКА

Плазменная струя, применяемая для сварки, представляет собой направленный поток частично или полностью ионизированного газа, имеющего температуру 10 000—20 000 °С. Плазму получают в плазменных горелках, пропуская газ через столб сжатой дуги. Дуга горит в узком канале сопла горелки, через который продувают газ. При этом столб дуги сжимается, что приводит к повышению в нем плотности энергии и температуры. Газ, проходящий через столб дуги, нагревается, ионизируется и выходит из сопла в виде высокотемпературной плазменной струи. В качестве плазмообразующих газов применяют азот, аргон, водород, гелий, воздух и их смеси. Газ выбирают в зависимости от процесса обработки и вида обрабатываемого материала.

Применяют два основных плазменных источника нагрева: *плазменную струю*, выделенную из столба косвенной дуги, и *плазменную*

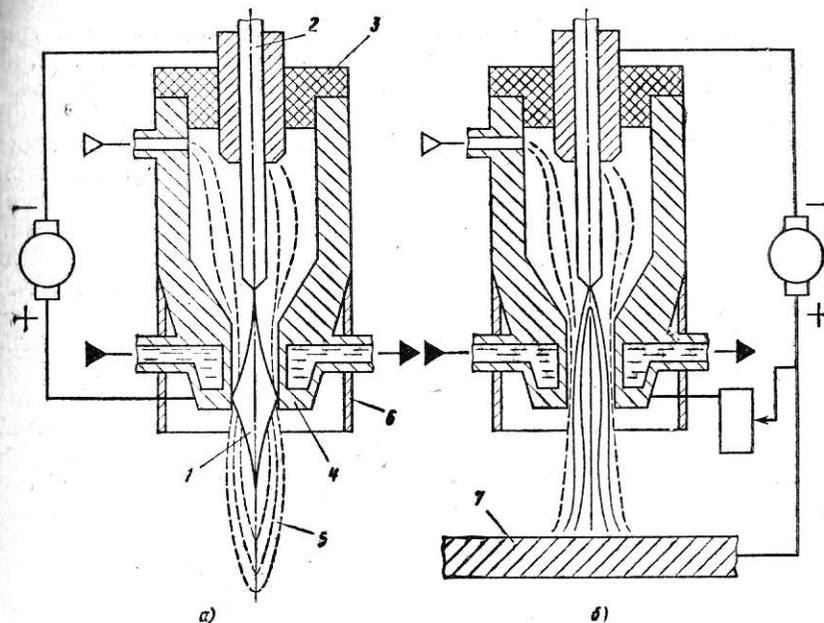


Рис. 5.12. Схемы процесса получения плазменных источников нагрева: а — плазменной струи, выделенной из дуги; б — плазменной дуги, совмещенной с плазменной струей

*дугу*, в которой дуга прямого действия совмещена с плазменной струей. Соответственно применяют две схемы плазменных горелок. В горелках для получения плазменной струи дуга 1 горит между вольфрамовым электродом 2 и соплом 4, к которому подключен положительный полюс источника тока (рис. 5.12, а). Электрод изолирован от корпуса горелки керамической прокладкой 3. Сопло интенсивно охлаждается водой. Из сопла выходит ярко светящаяся плазменная струя 5. Горелка питается постоянным током прямой полярности от источников с падающей характеристикой. Дугу зажигают с помощью осциллятора.

Плазменная струя представляет собой независимый источник теплоты, позволяющий в широких пределах изменять степень нагрева и глубину проплавления поверхности заготовок. Тепловая мощность плазменной струи ограничена и ее применяют для сварки и резки тонких металлических листов и неэлектропроводных материалов, а также напыления тугоплавких материалов на поверхность заготовок. Горелки, предназначенные для сварки, снабжены вторым концентрическим соплом 6, через который подается защитный газ.

Устройство горелок для получения плазменной дуги (рис. 5.12, б) принципиально не отличается от устройства горелок первого типа. Только дуга горит между электродом и заготовкой 7. Для облегчения зажигания дуги вначале возбуждается маломощная вспомогательная дуга между электродом и соплом. Для этого к соплу

подключен токоподвод от положительного полюса источника тока. Как только возникшая плазменная струя коснется заготовки, зажигается основная дуга, а вспомогательная выключается. Плазменная дуга, обладающая большей тепловой мощностью по сравнению с плазменной струей, имеет более широкое применение при обработке материалов. Ее используют для сварки высоколегированной стали, сплавов титана, никеля, молибдена, вольфрама и других материалов. Плазменную дугу применяют для резки материалов, особенно тех, резка которых другими способами затруднена, например меди, алюминия и др. С помощью плазменной дуги наплавляют тугоплавкие материалы на поверхность заготовок.

По сравнению с аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом плазменная дуга имеет ряд преимуществ. Во-первых, она является более концентрированным источником теплоты и вследствие этого обладает большей проплавляющей способностью. Плазменной дугой можно сваривать металл толщиной до 10 мм без разделки кромок и применения присадочного металла. При этом снижается тепловое влияние дуги на свариваемый металл и уменьшаются сварочные деформации. Во-вторых, плазменная дуга обладает более высокой стабильностью горения, что обеспечивает повышенное качество сварных швов. Это позволяет выполнять так называемую микроплазменную сварку металла толщиной 0,025—0,8 мм на токах 0,5—10 А. В-третьих, увеличивая ток и расход газа, можно получить так называемую проникающую плазменную дугу. В этом случае резко возрастает тепловая мощность дуги, скорость истечения и давление плазмы. Такая дуга дает сквозное проплавление и выдувает расплавленный металл (процесс резки). Недостаток плазменной сварки — недолговечность горелок вследствие частого выхода из строя сопел и электродов.

## 8. ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ СВАРКА

При электрошлаковой сварке основной и электродный металлы расплавляются теплотой, выделяющейся при прохождении электрического тока через шлаковую ванну. Процесс электрошлаковой сварки (рис. 5.13) начинается с образования шлаковой ванны 3 в пространстве между кромками основного металла 6 и формирующими устройствами (ползунами) 7, охлаждаемыми водой, подаваемой по трубам 1, путем расплавления флюса электрической дугой, возбуждаемой между сварочной проволокой 4 и вводной планкой 9. После накопления определенного количества жидкого шлака дуга шунтируется шлаком и гаснет, а подача проволоки и подвод тока продолжают. При прохождении тока через расплавленный шлак, являющийся электропроводящим электролитом, в нем выделяется теплота, достаточная для поддержания высокой температуры шлака (до 2000 °С) и расплавления кромок основного металла и электродной проволоки. Проволока вводится в зазор и подается в шлаковую ванну с помощью мундштука 5. Проволока служит для подвода тока и пополнения сварочной ванны 2 расплавленным металлом. Как

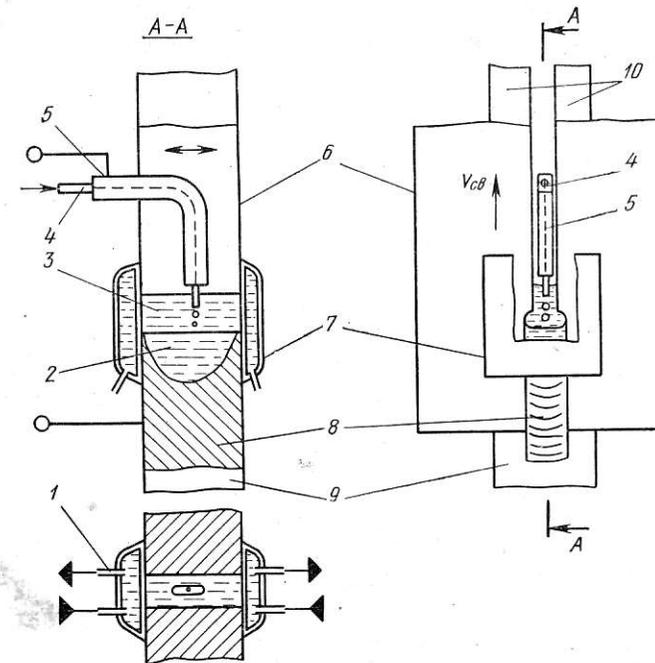


Рис. 5.13. Схема процесса электрошлаковой сварки

правило, электрошлаковую сварку выполняют при вертикальном положении свариваемых заготовок. По мере заполнения зазора между ними мундштук для подачи проволоки и формирующие ползуны передвигаются в вертикальном направлении, оставляя после себя затвердевший сварной шов 8.

В начальном и конечном участках шва образуются дефекты. В начале шва — непровар кромок, в конце шва — усадочная раковина и неметаллические включения. Поэтому сварку начинают на вводной 9, а заканчивают на выходной 10 планках, которые затем удаляют газовой резкой.

Шлаковая ванна — более распределенный источник теплоты, чем электрическая дуга. Основной металл расплавляется одновременно по всему периметру шлаковой ванны, что позволяет вести сварку металла большой толщины за один проход.

Заготовки толщиной до 150 мм можно сваривать одним электродом, совершающим поперечные колебания в зазоре для обеспечения равномерного разогрева шлаковой ванны по всей толщине. Металл толщиной более 150 мм сваривают тремя проволоками, а иногда и большим числом проволок, исходя из использования одного электрода на 45—60 мм толщины металла. Специальные автоматы обеспечивают подачу электродных проволок и их поперечное перемещение в зазоре.

Автоматы перемещаются непосредственно по свариваемому изделию (безрельсовые) или по рельсовой колонне, устанавливаемой

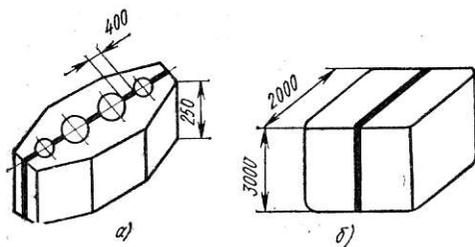


Рис. 5.14. Примеры применения электрошлаковой сварки:

а — архитрав пресса; б — баба бесшаботного молота

параллельно свариваемым кромкам. Скорость движения регулируется автоматически в зависимости от скорости заполнения зазора расплавленным металлом. Для сварки используют проволоку диаметром 2—3 мм. Сварочный ток составляет 750—1000 А. В качестве источников питания применяют специальные трансформаторы для электрошлаковой сварки с жесткой внешней характеристикой.

Электрошлаковая сварка имеет ряд преимуществ по сравнению с автоматической сваркой под флюсом: повышенную производительность, лучшую макроструктуру шва и меньшие затраты на выполнение 1 м сварного шва. Повышение производительности обусловлено непрерывностью процесса сварки, выполнением шва за один проход при любой толщине металла и увеличением сварочного тока в 1,5—2 раза. Макроструктура шва улучшается в результате отсутствия многослойности и получения более однородного по строению однопроходного шва. Затраты снижаются вследствие повышения производительности, упрощения подготовки кромок заготовок, уменьшения сечения шва, а также расхода проволоки, флюса и электроэнергии.

К недостаткам электрошлаковой сварки следует отнести образование крупного зерна в шве и околошовной зоне вследствие замедленного нагрева и охлаждения. После сварки необходима термическая обработка (отжиг или нормализация) для измельчения зерна в металле сварного соединения.

Электрошлаковую сварку широко применяют в тяжелом машиностроении для изготовления ковано-сварных и лито-сварных конструкций, таких, как станины и детали мощных прессов и станков, коленчатые валы судовых дизелей, роторы и валы гидротурбин, котлы высокого давления и т. п. (рис. 5.14). Толщина свариваемого металла составляет 50—2000 мм.

## 9. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА

Электронный луч представляет собой сжатый поток электронов, перемещающийся с большой скоростью от катода к аноду в сильном электрическом поле. При соударении электронного потока с твердым телом более 99 % кинетической энергии электронов переходит в тепловую, расходуемую на нагрев этого тела. Температура в месте соударения может достигать 5000—6000 °С. Электронный луч образуется за счет эмиссии электронов с нагретого в вакууме 133 ( $10^{-4} \div 10^{-5}$ ) Па катода 1 и с помощью электростатических и элек-

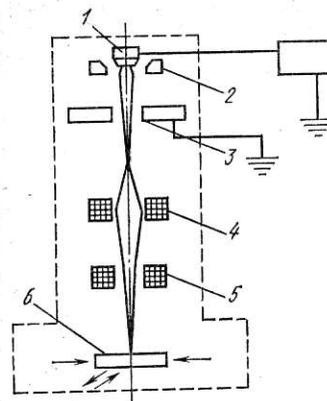
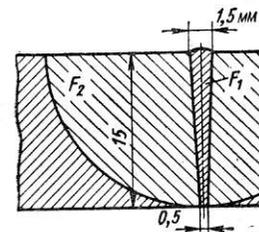


Рис. 5.15. Схема установки для электронно-лучевой сварки

Рис. 5.16. Кинжальное проплавление при электронно-лучевой сварке;  $F_2$  и  $F_1$  — сечения швов при дуговой и электронно-лучевой сварке



тромагнитных линз 4 фокусируется на поверхности свариваемых материалов (рис. 5.15).

В установках для электронно-лучевой сварки электроны эмитируются на катоде 1 электронной пушки; формируются в пучок электродом 2, расположенным непосредственно за катодом; ускоряются под действием разности потенциалов между катодом и анодом 3, составляющей 20—150 кВ и выше, затем фокусируются в виде луча и направляются специальной отклоняющей магнитной системой 5 на обрабатываемое изделие 6. На формирующий электрод 2 подается отрицательный или нулевой по отношению к катоду потенциал. Фокусировкой достигается высокая удельная мощность (до  $5 \cdot 10^5$  кВт/м<sup>2</sup> и выше). Ток электронного луча невелик (от нескольких миллиампер до единиц ампер).

При перемещении заготовки под неподвижным лучом образуется сварной шов. Иногда при сварке перемещают сам луч вдоль неподвижных кромок с помощью отклоняющих систем. Отклоняющие системы используют также и для колебаний электронного луча поперек и вдоль шва, что позволяет сваривать с присадочным металлом и регулировать тепловое воздействие на металл.

В современных установках для сварки, сверления, резки или фрезерования электронный луч фокусируется на площади диаметром менее 0,001 см, что позволяет получить большую удельную мощность. При использовании обычных сварочных источников теплоты (дуги, газового пламени) металл нагревают и плавят за счет распространения теплоты от поверхности в глубину, при этом форма зоны расплавления в сечении приближается к полукругу  $F_2$ . При сварке электронным лучом теплота выделяется непосредственно в самом металле  $F_1$ , причем наиболее интенсивно на некоторой глубине под его поверхностью. Отношение глубины проплавления к ширине может достигать 20 : 1; такое проплавление называется кинжальным (рис. 5.16).

Высокая концентрация теплоты в пятне нагрева позволяет сверлить такие материалы, как сапфир, рубин, алмаз, стекло. Незначи-

тельная ширина зоны теплового воздействия дает возможность резко уменьшить деформацию заготовок. Кроме того, за счет вакуума в камере обеспечиваются зеркальная поверхность соединения и дегазация расплавленного металла.

Электронно-лучевой сваркой изготавливают детали из тугоплавких химически активных металлов и их сплавов (вольфрамовых, танталовых, ниобиевых, циркониевых, молибденовых и т. п.), а также из алюминиевых и титановых сплавов и высоколегированных сталей. Металлы и сплавы можно сваривать в однородных и разнородных сочетаниях, со значительной разностью толщин, температур плавления и других теплофизических свойств. Минимальная толщина свариваемых заготовок составляет 0,02 мм, максимальная — до 100 мм.

Электронно-лучевой сваркой можно соединять малогабаритные изделия, применяемые в электронике и приборостроении, и крупногабаритные изделия длиной и диаметром несколько метров.

## 10. ГАЗОВАЯ СВАРКА

При сварке место соединения нагревают до расплавления высокотемпературным газовым пламенем (рис. 5.17). При нагреве газосварочным пламенем 4 кромки свариваемых заготовок 1 расплавляются, а зазор между ними заполняется присадочным металлом 2, который вводят в пламя горелки 3 извне. Газовое пламя получают при сгорании горючего газа в атмосфере технически чистого кислорода.

Кислород, используемый для сварочных работ, поставляют к месту потребления в стальных баллонах под давлением 15 МПа. Баллоны окрашивают в голубой цвет с черной надписью «Кислород».

**Кислородный баллон** (рис. 5.18) представляет собой стальной цилиндр со сферическим дном 6 и горловиной 4 для крепления запорного вентиля 2. На нижнюю часть баллона насаживают башмак 5, позволяющий ставить баллон вертикально. На горловине имеется кольцо 3 с резьбой для навертывания защитного колпака 1. Средняя жидкостная вместимость баллона 40 дм<sup>3</sup>. При давлении 15 МПа он вмещает ~6000 дм<sup>3</sup> кислорода.

Для снижения давления газа на выходе из баллона и поддержания постоянной величины рабочего давления применяют **газовые редукторы**. Кислородные редукторы понижают давление от 15 до 0,1 МПа, а ацетиленовые — от 1,6 до 0,02 МПа. Редукторы, применяемые в сварочной технике, обычно имеют два манометра, один из которых измеряет давление газа до входа в редуктор, второй — на выходе из него.

Редукторы для различных газов отличаются лишь устройством присоединительной части, которая соответствует устройству вентиля соответствующего баллона. Корпус редуктора окрашивают в определенный цвет, например в голубой для кислорода, в белый для ацетилена и т. д. К сварочной горелке кислород от редуктора подают через специальные резиновые шланги.

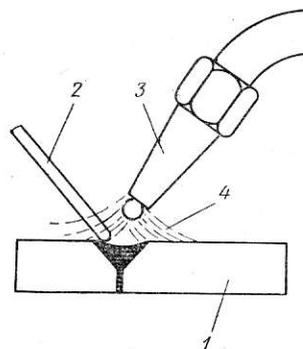


Рис. 5.17. Схема газовой сварки

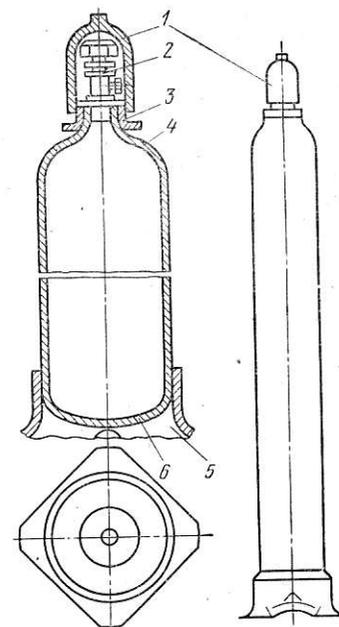
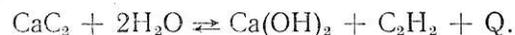


Рис. 5.18. Схема газового баллона

В качестве горючих газов можно также применять природные газы, водород, пары бензина и керосина, нефтяные газы и др. Перечисленные горючие газы могут быть использованы главным образом для кислородной резки, не требующей высокой температуры пламени. Для газовой сварки применяют ацетилен, так как он имеет большую теплоту сгорания по сравнению с другими горючими газами и высокую температуру пламени (3200 °С). Ацетилен (С<sub>2</sub>Н<sub>2</sub>) — горючий газ с низкой теплотой сгорания 54 кДж/м<sup>3</sup>. Его получают в специальных аппаратах — газогенераторах — при взаимодействии воды с карбидом кальция:



При разложении 1 кг карбида кальция образуется 250—300 дм<sup>3</sup> ацетилена. Ацетилен взрывоопасен при избыточном давлении свыше 0,175 МПа, хорошо растворяется в ацетоне (в одном объеме ацетона при давлении 0,15 МПа растворяется 23 объема ацетилена). Последнее свойство используют для его безопасного хранения в баллонах.

**Ацетиленовые генераторы** могут быть различных систем и размеров, их различают по способу взаимодействия воды и карбида кальция, по давлению выходящего газа, по производительности.

Наиболее простая конструкция у генератора системы вода на карбид, при которой воду периодически подают на карбид, насыпанный в открытую сверху корзинку (рис. 5.19). Корзинку помещают в горизонтальную цилиндрическую реторту, герметически закрывающуюся снизу.

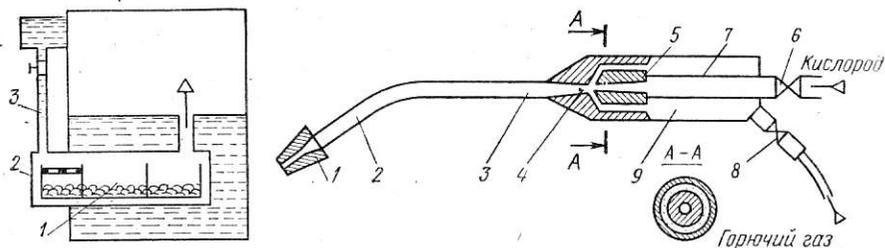


Рис. 5.19. Схема газогенератора системы вода на карбид:

1 — загрузочная корзинка; 2 — реторта; 3 — трубка для подачи воды в реторту

Рис. 5.20. Схема газосварочной инжекторной горелки

На пути следования газа от генератора к сварочной горелке устанавливают предохранительные **водяные затворы**, предотвращающие проникание кислородно-ацетиленового пламени в ацетиленовый генератор при его обратном ударе. Обратный удар возникает, когда скорость истечения газов становится меньше скорости их горения. Практически обратный удар происходит при перегреве горелки и засорении сопла или центрального отверстия инжектора.

Ацетиленовые генераторы взрывоопасны и нуждаются в специальном обслуживании. При работе одного-двух сварочных постов и в полевых условиях целесообразно использовать баллонный ацетилен. **Ацетиленовые баллоны** окрашивают в белый цвет и делают на них красной краской надпись «Ацетилен». Их конструкция аналогична конструкции кислородных баллонов. Давление ацетилена в баллоне 1,5 МПа. В баллоне находятся пористая масса (активированный уголь) и ацетон. Растворение ацетилена в ацетоне позволяет поместить в малом объеме большое количество ацетилена. Растворенный в ацетоне ацетилен пропитывает пористую массу и становится безопасным.

**Газосварочные горелки** используют для образования газосварочного пламени. В промышленности наиболее распространена инжекторная горелка, так как она более безопасна и работает на низком и среднем давлениях (рис. 5.20). В инжекторной горелке кислород под давлением 0,1—0,4 МПа через регулировочный вентиль 6 и трубку 7 подается к инжектору 5. Выходя с большой скоростью из узкого канала инжекторного конуса, кислород создает значительное разрежение в камере 4 и засасывает горючий газ, поступающий через вентиль 8 в ацетиленовые каналы горелки 9 и камеру смешения 3, где образуется горючая смесь. Затем горючая смесь поступает по наконечнику 2 к мундштуку 1, на выходе из которого при сгорании образуется сварочное пламя.

Горелки этого типа имеют сменные наконечники с различными диаметрами выходных отверстий инжектора и мундштука, что позволяет регулировать мощность ацетилено-кислородного пламени. Обычно горелки имеют семь номеров сменных наконечников.

Газосварочное пламя образуется в результате сгорания ацетилена, смешивающегося в определенных пропорциях с кислородом в сварочных горелках. Ацетилено-кислородное пламя состоит из трех зон (рис. 5.21): ядра пламени 1, средней зоны 2 (сварочной), факела пламени 3 ( $l$  — длина). На рисунке показано строение газосварочного пламени и распределение температуры по его оси. В зоне 1 происходит постепенный нагрев до температуры воспламенения газовой смеси, поступающей из мундштука; в зоне 2 — первая стадия горения ацетилена за счет кислорода, поступающего из баллона:



Зона 2, имеющая самую высокую температуру и обладающая восстановительными свойствами, называется сварочной, или рабочей, зоной. В зоне 3 (факеле) протекает вторая стадия горения ацетилена за счет атмосферного кислорода:



Углекислый газ и пары воды при высоких температурах окисляют металл, поэтому эту зону называют окислительной. Газосварочное пламя называется нормальным, когда соотношение газов  $\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2 \approx 1$ . Нормальным пламенем сваривают большинство сталей. При увеличении содержания кислорода ( $\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2 > 1$ ) пламя приобретает голубоватый оттенок и имеет заостренную форму ядра. Такое пламя обладает окислительными свойствами и может быть использовано только при сварке латуни. В этом случае избыточный кислород образует с цинком, содержащимся в латуни, тугоплавкие оксиды, пленка которых препятствует дальнейшему испарению цинка.

При увеличении содержания ацетилена ( $\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2 < 1$ ) пламя становится коптящим, удлиняется и имеет красноватый оттенок. Такое пламя называют науглероживающим и применяют для сварки чугуна и цветных металлов, так как в этом случае компенсируется выгорание углерода и восстанавливаются оксиды цветных металлов.

Для газовой сварки сталей присадочную проволоку выбирают в зависимости от состава сплава свариваемого металла. Для сварки чугуна применяют специальные литые чугунные стержни; для наплавки износостойких покрытий — литые стержни из твердых сплавов. Для сварки цветных металлов и некоторых специальных сплавов используют флюсы, которые могут быть в виде порошков и паст; для сварки меди и ее сплавов — кислые флюсы (буру, буру с борной кислотой); для сварки алюминиевых сплавов — бескислородные флюсы на основе фтористых, хлористых солей лития, калия, натрия и кальция. Роль флюса состоит в растворении оксидов и образовании шлаков, легко всплывающих на поверхность сварочной ванны. Во флюсы можно вводить элементы, раскисляющие и легирующие наплавленный металл.

Для сварки латуни применяют газофлюсовую сварку с дозированной подачей в сварочную ванну газового флюса. Флюс, предста-

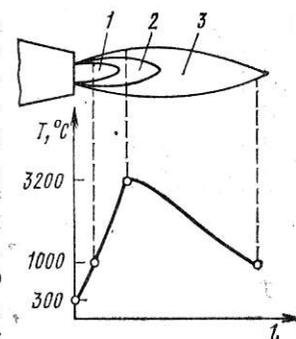


Рис. 5.21. Газосварочное пламя

вляющий собой эфир борной кислоты ( $\text{BOCH}_3$ ), подают в ацетиленовый канал сварочной горелки, где он сгорает в пламени и образует борный ангидрид, связывающий оксиды цинка. В результате образуется слой шлака, препятствующий дальнейшему выгоранию цинка.

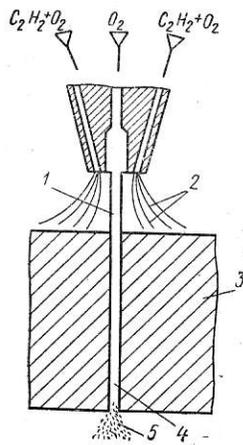
При газовой сварке заготовки нагреваются более плавно, чем при дуговой; это и определяет основные области ее применения: для сварки металлов малой толщины (0,2—3 мм); легкоплавких цветных металлов и сплавов; для металлов и сплавов, требующих постепенного нагрева и охлаждения, например инструментальных сталей, чугуна, латуней; для пайки и наплавочных работ; для подварки дефектов в чугунных и бронзовых отливках. При увеличении толщины металла производительность газовой сварки резко снижается. При этом за счет медленного нагрева свариваемые изделия значительно деформируются. Это ограничивает применение газовой сварки.

## 11. ТЕРМИЧЕСКАЯ РЕЗКА МЕТАЛЛОВ

**Газокислородная резка** заключается в сжигании металла в струе кислорода и удалении этой струей образующихся оксидов. При горении железа в кислороде выделяется значительное количество теплоты по реакции



Для начала горения металл подогревают до температуры его воспламенения в кислороде (например, сталь — до 1000—1200 °С). На рис. 5.22 показан процесс газокислородной резки. Металл 3 нагревается в начальной точке реза подогревающим ацетилено-кислородным пламенем 2, затем направляется струя режущего кислорода 1, и нагретый металл начинает гореть. Горение металла сопровождается выделением теплоты, которая вместе с подогревающим пламенем разогревает лежащие ниже слои на всю толщину металла. Образующиеся оксиды 5 расплавляются и выдуваются струей режущего кислорода из зоны реза 4. Конфигурация перемещения струи соответствует заданной форме реза.



Для обеспечения нормального процесса резки металл должен отвечать следующим требованиям: температура его плавления должна быть выше температуры горения в кислороде; температура плавления оксидов металла должна быть ниже температуры его плавления; количество теплоты, выделяющейся при сгорании металла в кислородной струе, должно быть достаточным для поддержания непрерывного процесса резки; теплопроводность металла не должна быть слишком высокой, в противном случае теплота слишком интенсивно отводится

Рис. 5.22. Схема газокислородной резки

и процесс резки прерывается; образующиеся оксиды должны быть достаточно жидкотекучими и легко выдвигаться вниз струей режущего кислорода.

Практически указанным требованиям отвечают железо, низкоуглеродистые и низколегированные стали.

По характеру и направленности кислородной струи различают следующие способы резки.

**Разделительная резка** — режущая струя направлена нормально к поверхности металла и прорезает его на всю толщину. Разделительной резкой раскраивают листовую сталь,резают профильный материал, вырезают косынки, круги, фланцы и т. п. **Поверхностная резка** — режущая струя направлена под очень малым углом к поверхности металла (почти параллельно ей) и обеспечивает грубую его строжку или обдирку. Ею удаляют поверхностные дефекты отливок.

**Резка кислородным копьем** — копьё образуется тонкостенной стальной трубкой, присоединенной к рукоятке и свободным концом прижатой к прожигаемому металлу. Резка начинается с подогрева конца заготовки сварочной дугой или горелкой. При пропускании кислорода через трубку (копьё) ее конец быстро загорается и дальнейший подогрев не нужен. Копье прижимают к металлу и углубляют в него. Таким образом, выжигают отверстия круглого сечения. Кислородным копьем отрезают прибыли крупных отливок, прожигают легки в металлургических печах, отверстия в бетоне и т. п.

Резка может быть ручной и машинной. Для ручной резки применяют универсальный резак типа УР со сменными мундштуками (рис. 5.23). В резаке конструктивно объединены подогревающая часть и режущая. Подогревающая часть аналогична таковой у сварочных горелок. Режущая часть состоит из дополнительной трубки 4 для подачи режущего кислорода. В мундштуке находятся два концентрически расположенных отверстия для выхода подогревающего пламени 1 и режущей струи 2. Мундштук резака 3 образует прямой угол со стволом. При замене ацетилена другими горючими газами в резаке увеличивают сечения каналов инжектора и смесительной камеры.

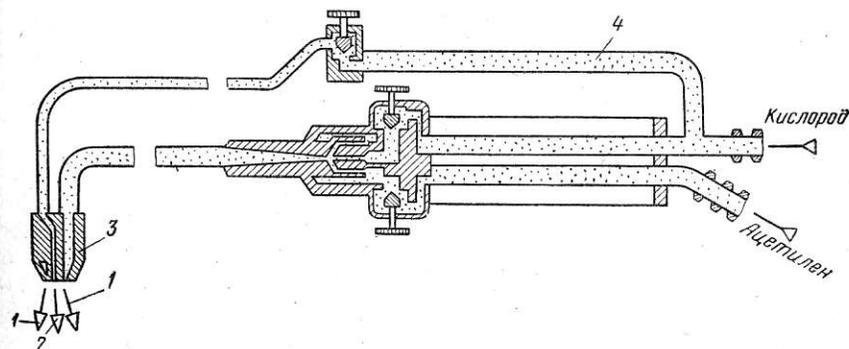


Рис. 5.23. Схема газокислородного резака

Ручная резка вследствие неравномерности перемещения резака и вибрации режущей струи не обеспечивает высокого качества поверхности реза, поэтому полость реза механически обрабатывают.

Для получения реза высокого качества применяют машинную резку, которая обеспечивает равномерное перемещение резака по линии реза, строгую перпендикулярность режущей струи к разрезаемой поверхности и постоянное расстояние мундштука от поверхности металла. Машинную резку выполняют специальными автоматами и полуавтоматами с одним или несколькими резаками, при вырезке прямолинейных и криволинейных фасонных заготовок — по металлическому копиру.

Обычной кислородной резкой разрезают металлы толщиной 5—300 мм. При резке металла толщиной более 300 мм применяют специальные резаки.

При кислородно-флюсовой резке в зону резки вместе с режущим кислородом вдувают порошкообразный флюс с железной основой. При сгорании флюса в кислородной струе выделяется дополнительное количество теплоты. В то же время частицы флюса, выходя из сопла резака с большой скоростью, механически удаляют тугоплавкие оксиды. Для получения флюса к железному порошку примешивают флюсообразующие добавки, поэтому кроме термического и механического удаления оксидов происходит флюсование, т. е. перевод их в более легкоплавкие соединения. Кислородно-флюсовую резку используют для высокохромистых и хромоникелевых сталей, чугунов, медных сплавов. Кислородно-флюсовую резку выполняют с помощью специальной аппаратуры: флюсопитателя и кислородного резака с приспособлениями для подачи флюса.

При воздушно-дуговой резке металл расплавляется дугой неплавящимся графитовым электродом, а расплавленный металл выдувается из полости реза потоком сжатого воздуха, подаваемого параллельно электроду. Воздушно-дуговую резку можно выполнять во всех пространственных положениях. Основная область ее применения — поверхностная обработка металла (различные углубления в виде канавок, снятие лишнего или дефектного металла и т. п.). Применяют разделительную воздушно-дуговую резку. Для воздушно-дуговой резки используют специальные резаки, представляющие собой держатель электродов, головка которого имеет сопла для подачи воздуха.

Плазменно-дуговую резку выполняют плазменной дугой и плазменной струей. При резке плазменной дугой металл выплавляется из полости реза направленным потоком плазмы, совпадающим с токоведущим столбом создающей его дуги прямого действия. Этим способом разрезают толстые листы алюминия и его сплавов (до 80—120 мм), высоколегированную сталь и медные сплавы.

Плазменной струей, полученной в столбе дугового разряда независимой дуги, разрезают неэлектропроводные материалы (например, керамику), тонкие стальные листы, алюминийевые и медные сплавы, жаропрочные сплавы и т. д. При плазменной резке используют аргон, его смесь с водородом, воздух и другие газы. Скорость резки плазменной дугой при прочих равных условиях выше скорости резки плазменной струей. Плазменную резку выполняют специальным резаком, называемым плазмотроном.

## ГЛАВА III. ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ И МЕХАНИЧЕСКАЯ СВАРКА

### 1. КОНТАКТНАЯ СВАРКА

Контактная сварка относится к видам сварки с кратковременным нагревом места соединения без оплавления или с оплавлением и осадкой разогретых заготовок. Характерная особенность этих процессов — пластическая деформация, в ходе которой формируется сварное соединение.

Место соединения разогревается проходящим по металлу электрическим током, причем максимальное количество теплоты выделяется в месте сварочного контакта (рис. 5.24). Количество выделяемой теплоты определяется законом Джоуля — Ленца:

$$Q \approx I^2 R t,$$

где  $Q$  — количество теплоты, выделяемое в сварочном контуре, Дж;  $R$  — полное электросопротивление сварочного контура, Ом;  $I$  — сварочный ток, А;  $t$  — время протекания тока, с.

Полное электросопротивление сварочного контура  $R$  состоит из электросопротивлений выступающих концов  $L$  свариваемых заготовок  $R_{заг}$ , сварочного контакта  $R_K$  и электросопротивления между электродами и заготовками  $R_{эл}$ , т. е.

$$R \approx R_{заг} + R_K + R_{эл}.$$

Электросопротивление  $R_K$  имеет наибольшее значение, так как из-за неровностей поверхности стыка даже после тщательной обработки заготовки соприкасаются только в отдельных точках (рис. 5.25). В связи с этим действительное сечение металла, через которое проходит ток, резко уменьшается. Кроме того, на поверхности свариваемого металла имеются пленки оксидов и загрязнения с малой электропроводностью, которые также увеличивают электросопротивление контакта. В результате в точках контакта металл нагревается до термопластического состояния или до оплавления. При непрерывном сдавливании нагретых заготовок образуются новые точки соприкосновения, пока не произойдет полное сближение до межзатомных расстояний, т. е. сварка поверхностей.

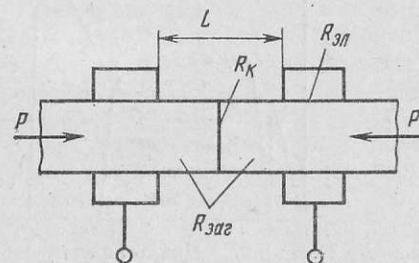


Рис. 5.24. Схема контактной сварки

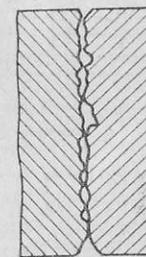


Рис. 5.25. Физический контакт

Контактную сварку классифицируют по типу сварного соединения, определяющего вид сварочной машины, и по роду тока, питающего сварочный трансформатор. По типу сварного соединения различают сварку стыковую, точечную и шовную.

По роду тока различают сварку переменным током, главным образом однофазным частотой 50 Гц; импульсом постоянного тока, когда первичная обмотка сварочного трансформатора подключается к выпрямительной установке, вследствие индуктивности трансформатора ток в первичной обмотке постепенно возрастает и во вторичной обмотке индуцируется нарастающий импульс сварочного тока; аккумулярированной энергией.

## 2. СТЫКОВАЯ СВАРКА

Стыковая сварка — разновидность контактной сварки, при которой заготовки свариваются по всей поверхности соприкосновения. Свариваемые заготовки закрепляют в зажимах стыковой машины (рис. 5.26). Зажим 3 установлен на подвижной плите 4, перемещающейся в направляющих, зажим 2 укреплен на неподвижной плите 1. Сварочный трансформатор соединен с плитами гибкими шинами и питается от сети через включающее устройство. Плиты перемещаются, и заготовки сжимаются под действием усилия  $P$ , развиваемого механизмом осадки.

Стыковую сварку с разогревом стыка до пластического состояния и последующей осадкой называют сваркой сопротивлением, а при разогреве торцов заготовок до оплавления и последующей осадкой — сваркой оплавлением. Для правильного формирования сварного соединения необходимо, чтобы процесс протекал в определенной последовательности. Совместное графическое изображение тока и давления, изменяющихся в процессе сварки, называют циклограммой сварки.

Циклограмма контактной стыковой сварки сопротивлением представлена на рис. 5.27. Перед сваркой заготовки должны быть очищены от оксидных пленок и торцы их плотно пригнаны друг к другу. Для подгонки необходима механическая обработка торцов. Заготовки сдавливаются усилием  $P$ , затем включается ток, металл разо-

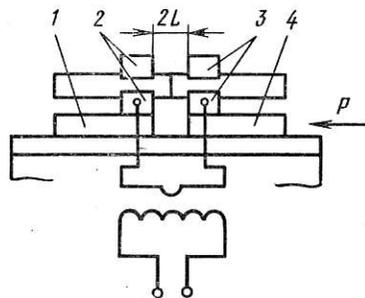


Рис. 5.26. Схема контактной стыковой сварки

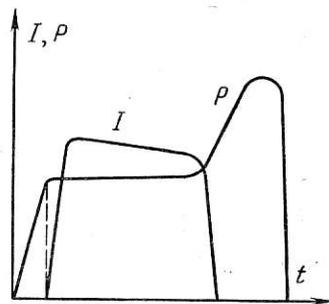


Рис. 5.27. Циклограмма контактной стыковой сварки сопротивлением

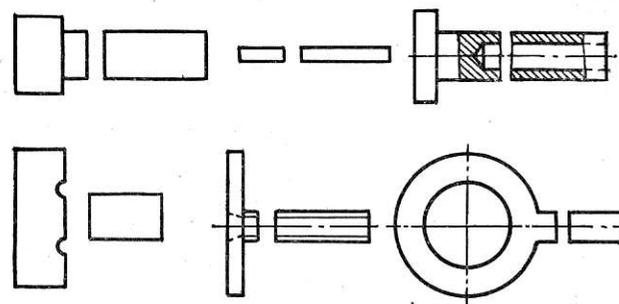


Рис. 5.28. Типы сварных соединений, выполняемых стыковой сваркой сопротивлением

гревается до пластического состояния, затем заготовки снова сдавливают (осаживают). В месте сварки образуется усиление металла.

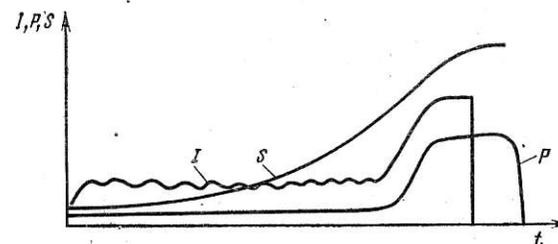
Параметрами режима контактной стыковой сварки сопротивлением являются плотность тока  $j$ , А/мм<sup>2</sup>, удельное усилие сжатия торцов заготовки  $p$ , Па, и время протекания тока  $t$ , с, которое определяют косвенно через величину осадки, зависящую от установочной длины  $L$ . Установочной длиной  $L$  называют расстояние от торца заготовки до внутреннего края электрода стыковой машины, измеренное до начала сварки. Длина  $L$  зависит от теплофизических свойств металла, конфигурации стыка и размеров заготовки.

Типы сварных соединений, выполняемых стыковой сваркой сопротивлением, представлены на рис. 5.28. Этим способом соединяют заготовки малого сечения (до 100 мм<sup>2</sup>), так как при больших сечениях нагрев будет неравномерным. Сечения соединяемых заготовок должны быть одинаковыми по форме с простым периметром (круг, квадрат, прямоугольник с малым отношением сторон). Сваркой сопротивлением можно сваривать низкоуглеродистые, низколегированные конструкционные стали, алюминиевые и медные сплавы.

Стыковая сварка оплавлением имеет две разновидности: непрерывным и прерывистым оплавлением. При непрерывном оплавлении между заготовками, установленными в электродах машины, оставляют зазор, подключают ток и равномерно сближают заготовки. Соприкосновение происходит вначале по отдельным небольшим площадкам, через которые протекает ток высокой плотности. При этом под действием магнитного поля расплавленный и кипящий металл выбрасывается наружу. После достижения равномерного оплавления всей поверхности стыка заготовки осаживают. Циклограмма сварки непрерывным оплавлением показана на рис. 5.29.

Рис. 5.29. Цикл контактной стыковой сварки оплавлением:

$S$  — перемещение плиты, мм;  
 $P$  — усилие сжатия заготовок;  
 $I$  — сварочный ток



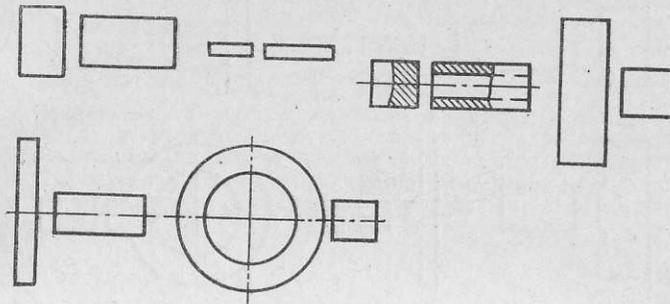


Рис. 5.30. Типы сварных соединений стыковой сварки оплавлением

При прерывистом оплавлении зажатые заготовки сближают под током, приводят их в кратковременное соприкосновение и вновь разъединяют на небольшое расстояние. Быстро повторяя одно за другим сближения и разъединения, выполняют оплавление всего сечения. Затем выключают ток и сдавливают заготовку. Под давлением часть расплавленного металла вместе с оксидами выдавливается из зоны сварки.

Сварка оплавлением имеет преимущества перед сваркой сопротивлением. В процессе оплавления выравниваются все неровности стыка, а оксиды и загрязнения удаляются, поэтому не требуется особой подготовки места соединения. Можно сваривать заготовки с сечением сложной формы, а также заготовки с различными сечениями, разнородные металлы (быстрорежущую и углеродистую стали, медь и алюминий и т. д.).

Типы сварных соединений, выполняемых стыковой сваркой оплавлением, приведены на рис. 5.30.

Наиболее распространенными изделиями, изготавливаемыми стыковой сваркой, служат элементы трубчатых конструкций, колеса и кольца, инструмент, рельсы, железобетонная арматура.

### 3. ТОЧЕЧНАЯ СВАРКА

Точечная сварка — разновидность контактной сварки, при которой заготовки соединяются в отдельных точках. При точечной сварке заготовки собирают внахлестку и зажимают с усилием  $P$  между двумя электродами, подводящими ток к месту сварки (рис. 5.31). Соприкасающиеся с медными электродами поверхности свариваемых заготовок нагреваются медленнее их внутренних слоев. Нагрев продолжают до пластического состояния внешних слоев и до расплавления внутренних слоев. Затем выключают ток и снимают давление. В результате образуется литая сварная точка.

Точечная сварка в зависимости от расположения электродов по отношению к свариваемым заготовкам может быть двусторонней и односторонней. При двусторонней сварке (рис. 5.31, а) две (или больше) заготовки 1 сжимают между электродами 2 точечной ма-

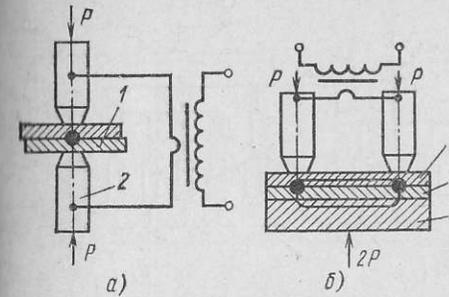


Рис. 5.31. Схема контактной точечной сварки: а — двусторонней; б — односторонней

шины. При односторонней сварке (рис. 5.31, б) ток распределяется между верхним и нижним листами 3 и 4, причем нагрев осуществляется частью тока, протекающего через нижний лист. Для увеличения тока, проходящего через нижний лист, предусмотрена медная подкладка 5. Односторонней сваркой можно соединять заготовки одновременно двумя точками. Параметры режима точечной сварки: удельное усилие сжатия, МПа; плотность тока  $j$ , А/мм<sup>2</sup>; время протекания тока  $t$ , с.

На рис. 5.32 показана одна из применяемых циклограмм точечной сварки. Весь цикл сварки состоит из четырех стадий: сжатие свариваемых заготовок между электродами; включение тока и разогрев места контакта до температуры плавления, сопровождающийся образованием литого ядра точки; выключение тока и увеличение сжатия для улучшения структуры сварной точки; снятие усилия с электродов. Перед сваркой место соединения очищают от оксидных пленок (наждачным кругом или травлением).

Типы сварных соединений, выполняемых точечной сваркой, показаны на рис. 5.33. Точечной сваркой изготавливают штампованные заготовки при соединении отдельных штампованных элементов сварными точками. В этом случае упрощается технология изготовления сварных узлов и повышается производительность. Точечную сварку применяют для изготовления изделий из низкоуглеродистых, углеродистых, низколегированных и высоколегированных сталей, алюминиевых и медных сплавов. Толщина свариваемых металлов составляет 0,5—5 мм.

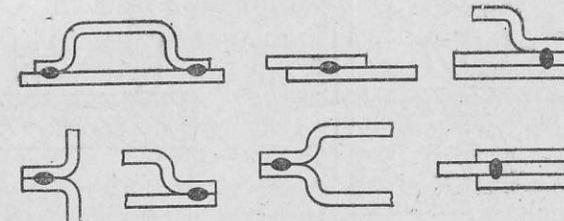


Рис. 5.33. Типы сварных соединений точечной сварки

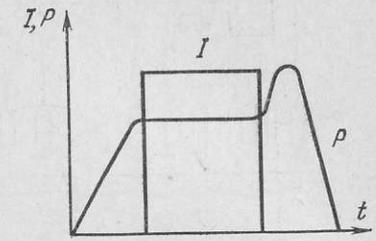


Рис. 5.32. Циклограмма контактной точечной сварки

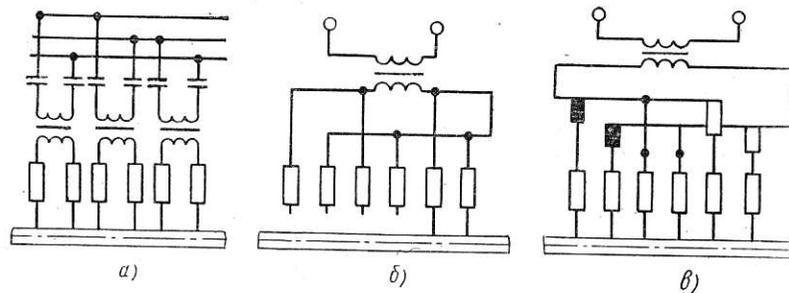


Рис. 5.34. Схемы односторонней многоточечной сварки

Многоточечная контактная сварка — разновидность контактной сварки, когда за один цикл свариваются несколько точек. Многоточечную сварку выполняют по принципу односторонней точечной сварки. Многоточечные машины могут иметь от одной пары до 100 пар электродов, соответственно можно сваривать 2—200 точек одновременно. Многоточечной сваркой сваривают одновременно и последовательно. В первом случае все электроды сразу прижимают к изделию, что обеспечивает меньшее коробление и большую точность сборки. Ток распределяется между прижатыми электродами специальным токораспределителем, включающим электроды попарно (рис. 5.34, а). Во втором случае пары электродов опускают поочередно или одновременно, а ток подключают поочередно к каждой паре электродов от сварочного трансформатора (рис. 5.34, б и в). Многоточечную сварку применяют в основном в массовом производстве, где требуется большое число сварных точек на заготовке.

#### 4. ШОВНАЯ СВАРКА

Шовная сварка — разновидность контактной сварки, при которой между свариваемыми заготовками образуется прочное и плотное соединение. Электроды выполняют в виде плоских роликов, между которыми пропускают свариваемые заготовки.

В процессе шовной сварки листовые заготовки 1 соединяют внахлестку, зажимают между электродами 2 (рис. 5.35) и пропускают

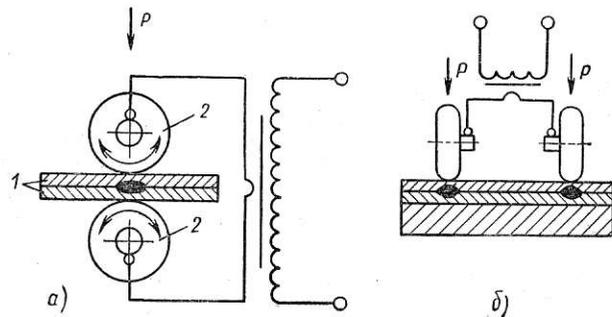


Рис. 5.35. Схема шовной сварки

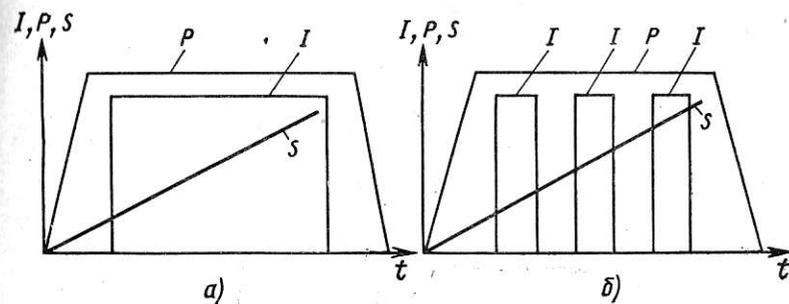


Рис. 5.36. Циклы шовной сварки при включении тока: а — непрерывным; б — прерывистым;  $P$  — усилие сжатия;  $S$  — перемещение роликов;  $I$  — сварочный ток;  $t$  — время

ток. При движении роликов по заготовкам образуются перекрывающиеся друг друга сварные точки, в результате чего получается сплошной герметичный шов. Шовную сварку, так же как и точечную, можно выполнить при двустороннем а и одностороннем б расположениях электродов.

Циклограммы процесса шовной сварки бывают с непрерывным включением тока (рис. 5.36, а) и с прерывистым (рис. 5.36, б). Последовательность этапов технологических операций в начале и при завершении сварки шва такая же, как и при точечной. Циклограмму с непрерывным включением тока применяют для сварки коротких швов и металлов и сплавов, не склонных к росту зерна и не претерпевающих заметных структурных превращений при перегреве околошовной зоны (низкоуглеродистые и низколегированные стали). Циклограмма с прерывистым включением тока обеспечивает стабильность процесса и высокое качество сварного соединения при малой зоне термического влияния. Ее используют при сварке длинных швов на заготовках из высоколегированных сталей и алюминиевых сплавов.

Шовную сварку применяют в массовом производстве при изготовлении различных сосудов. Толщина свариваемых листов составляет 0,3—3 мм. Шовной сваркой выполняют те же типы сварных соединений, что и точечной, но используют для получения герметичного шва.

#### 5. СВАРКА АККУМУЛИРОВАННОЙ ЭНЕРГИЕЙ

Сущность сварки аккумулярованной энергией заключается в том, что кратковременные сварочные операции осуществляются за счет энергии, запасенной в соответствующем приемнике, непрерывно заряжающемся и периодически разряжающемся на сварку.

Существуют четыре разновидности сварки аккумулярованной энергией: конденсаторная; электромагнитная; инерционная и аккумуляторная. Накопление энергии соответственно происходит в ба-

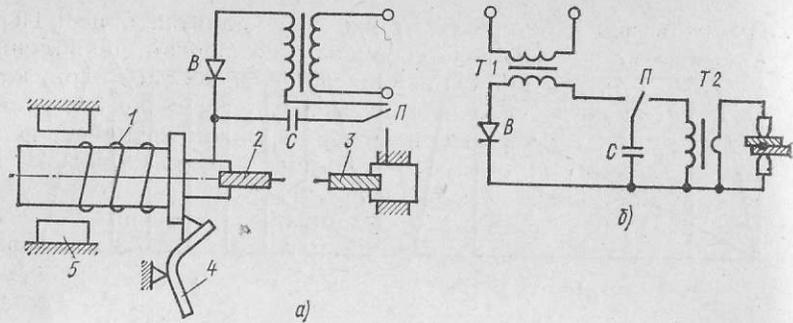


Рис. 5.37. Схемы конденсаторной сварки:

*a* — бестрансформаторная; *б* — трансформаторная; *T1* — повышающий трансформатор; *T2* — сварочный трансформатор; *C* — конденсаторная батарея; *B* — выпрямитель; *П* — переключатель

тарее конденсаторов, в магнитном поле специального сварочного трансформатора, во вращающихся частях генератора или в аккумуляторной батарее.

Наибольшее промышленное применение получила конденсаторная сварка. Энергия в конденсаторах накапливается при их зарядке от источника постоянного тока (генератора или выпрямителя), а затем в процессе их разрядки преобразуется в теплоту, используемую для сварки. Накопленную в конденсаторах энергию можно регулировать изменением емкости и напряжения зарядки:

$$A = CU^2/2,$$

где *C* — емкость конденсаторов, Ф; *U* — напряжение зарядки конденсаторов, В.

При конденсаторной сварке возможны точная дозировка количества энергии, не зависящая от внешних условий, в частности от напряжения сети; малое время протекания тока (тысячные и десятитысячные доли секунды) при высокой плотности тока, обеспечивающие небольшую зону термического влияния, что позволяет сваривать материалы малых толщин (до нескольких микрон); невысокая потребляемая мощность (0,2—2 кВ·А).

Существуют два способа конденсаторной сварки: бестрансформаторная, когда конденсаторы разряжаются непосредственно на свариваемые детали, и трансформаторная, когда конденсатор разряжается на первичную обмотку сварочного трансформатора, во вторичной цепи которого находятся предварительно сжатые свариваемые заготовки.

Примером бестрансформаторной сварки служит ударная конденсаторная сварка (рис. 5.37, *a*), когда концы обкладок конденсатора подключены непосредственно к свариваемым заготовкам 2 и 3; один из концов жестко закреплен, а другой может перемещаться в направляющих 5. Если освободить защелку 4, удерживающую заготовку 2, то под действием пружины 1 она быстро переместится по

направлению к неподвижной заготовке 3 и ударится о нее. Перед соударением возникает мощный разряд за счет энергии, накопленной в конденсаторе. Этот разряд оплавляет торцы обеих заготовок, которые после соударения свариваются между собой под действием усилия осадки. Бестрансформаторной сваркой можно сваривать встык проволоки и тонкие стержни разной толщины из разнородных металлов (вольфрам—никель, молибден—никель, медь—константан).

Трансформаторная конденсаторная сварка предназначена в основном для точечной и шовной сварки, но может быть использована и для стыковой. При этом способе разряд конденсатора преобразуется с помощью сварочного трансформатора (рис. 5.37, *б*). В левом положении переключателя *П* конденсатор *C* заряжается от источника постоянного тока. В правом положении переключателя происходит разряд конденсатора на первичную обмотку сварочного трансформатора *T2*. При этом во вторичной обмотке индуцируется ток большой силы, обеспечивающий сварку предварительно зажатых между электродами заготовок.

Конденсаторную сварку применяют в производстве электроизмерительных и авиационных приборов, часовых механизмов, фотоаппаратов, радиоламп и т. п.

## 6. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Контактную сварку выполняют с помощью специальных контактных машин. Контактные машины в зависимости от типа выполняемого на них соединения подразделяют на стыковые, точечные и шовные. Контактная машина состоит из трех основных частей: источника тока, прерывателя тока и механизма давления.

Электрическая схема контактных машин состоит из трех элементов: трансформатора, прерывателя тока и переключателя степеней мощности (рис. 5.38). Первичную обмотку трансформатора подключают к сети с напряжением 220—380 В; ее изготавливают секционной для изменения числа рабочих витков при переключении ступени мощности. Вторичная обмотка трансформатора состоит из одного или двух витков (вторичное напряжение 1—12 В). Сила вторичного тока составляет 1000—100 000 А.

При изменении числа витков первичной обмотки изменяется коэффициент трансформации *k*:

$$k = \omega_1/\omega_2 = U_1/U_2,$$

где  $\omega_1$  и  $\omega_2$  — число витков первичной и вторичной обмоток;  $U_1$  и  $U_2$  — соответственно первичное и вторичное напряжения обмотки.

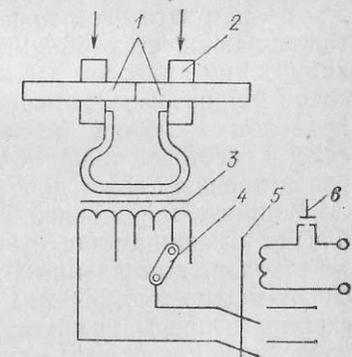


Рис. 5.38. Электрическая схема контактной машины:

1 — свариваемое изделие; 2 — контактная колодка; 3 — сварочный трансформатор; 4 — регулятор тока; 5 — электромагнитный прерыватель тока; 6 — включающая кнопка

Вторичное напряжение

$$U_2 = U_1 \omega_2 / \omega_1,$$

где  $\omega_2 = 1$ ;  $U_1$  — величина постоянная.

Следовательно, для изменения  $U_2$  необходимо изменить число включенных витков первичной обмотки  $\omega_1$ ; соответственно будет изменяться и ток.

В процессе сварки приходится периодически, а часто с весьма большой частотой включать и выключать ток. Для этой цели применяют прерыватели тока нескольких типов: простые механические контакторы, электромагнитные, электронные приборы (тиратронные и игнитронные), полупроводниковые приборы (тиристоры). Механические контакторы применяют главным образом на стыковых и точечных машинах неавтоматического действия небольшой мощности. Электромагнитные контакторы применяют для стыковой, точечной и шовной сварки на машинах малой и средней мощности.

Электронные и полупроводниковые приборы (тиристоры) обеспечивают включение и выключение тока со строго определенной продолжительностью импульсов тока и пауз. Их применяют для всех типов контактных машин автоматического действия.

Механизмы давления служат для сжатия заготовок между электродами машины, они могут иметь рычажно-педальный, электро-механический или пневматический привод давления.

Машины для стыковой сварки выпускают мощностью 5—500 кВ·А. Стыковые машины мощностью до 25 кВ·А применяют для сварки сопротивлением черных и цветных металлов; мощностью 25—250 кВ·А — для сварки сопротивлением и оплавлением черных металлов; мощностью 150—500 кВ·А — для автоматической сварки оплавлением с подогревом.

Машины для точечной сварки выпускают мощностью 0,1—250 кВ·А. Точечные машины мощностью 0,1—25 кВ·А применяют для сварки заготовок толщиной 0,1—2 мм из черных и цветных металлов; мощностью 50—100 кВ·А с пневматическим или электро-механическим приводом давления — для автоматической сварки в массовом производстве; мощностью 75—250 кВ·А с пневматическим приводом давления и электронными прерывателями тока — для сварки заготовок толщиной от 2 мм и выше. Эти машины могут быть использованы также для рельефной сварки.

Машины для шовной сварки по конструктивному оформлению близки к машинам для точечной сварки и отличаются от них формой электродов, выполненных в виде роликов. Шовные машины выпускают мощностью 25—200 кВ·А. В зависимости от способа шовной сварки (непрерывное или прерывистое включение тока) их снабжают механическими или электронными прерывателями тока.

## 7. ХОЛОДНАЯ СВАРКА

Холодную сварку выполняют без нагрева при нормальных и пониженных температурах. Физическая сущность процесса заключается в сближении свариваемых поверхностей до образования

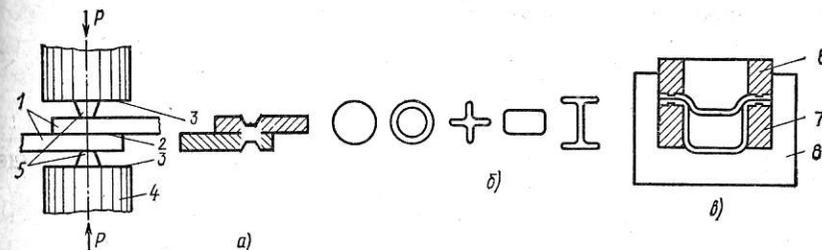


Рис. 5.39. Схема холодной сварки

металлических связей между ними. Такое сближение достигается приложением больших удельных усилий в месте соединения. В результате происходит совместная пластическая деформация. Большое усилие сжатия обеспечивает разрушение пленки оксидов на свариваемых поверхностях и образование чистых поверхностей металла. При холодной сварке свариваемые поверхности очищают от адсорбированных жировых пленок.

Холодной сваркой выполняют точечные, шовные и стыковые соединения. На рис. 5.39, а представлена схема холодной точечной сварки. Свариваемые заготовки 1 с тщательно зачищенной поверхностью 2 в месте соединения помещают между пуансонами 4, имеющими выступы 5. При сжатии пуансонов усилием  $P$  выступы 5 вдавливаются в металл до тех пор, пока поверхности 3 пуансонов не упрутся в наружную поверхность свариваемых заготовок. Форма сваренной точки зависит от формы выступа в пуансоне (рис. 5.39, б).

Для холодной шовной сварки применяют специальные ролики. Непрерывное соединение может быть получено путем сдавливания одновременно по всей длине соединения или путем прокатывания ролика. Швы, образующие замкнутый контур небольшой длины в виде кольца, прямоугольника и т. п., получают контурной сваркой. На рис. 5.39, в дана схема сварки полых деталей по контуру. Пуансоны 6 и 7 строго центрируют с помощью корпуса 8.

Холодной сваркой сваривают металлы и сплавы толщиной 0,2—15 мм. Удельные усилия, зависящие от состава и толщины свариваемого материала, в среднем составляют 150—1000 МПа.

Холодной сваркой в основном сваривают однородные или неоднородные металлы и сплавы, обладающие высокой пластичностью при нормальной температуре. В недостаточно пластичных металлах при больших деформациях могут образоваться трещины. Высокопрочные металлы и сплавы холодной сваркой не сваривают, так как для этого требуются очень большие удельные усилия, которые практически трудно осуществить.

Хорошо свариваются сплавы алюминия, кадмия, свинца, меди, никеля, золота, серебра, цинка и тому подобные металлы и сплавы. К преимуществам этого способа относятся малый расход энергии, незначительное изменение свойства металла, высокая производительность, возможность автоматизации.

Для соединения холодной точечной сваркой могут быть использованы любые прессы (винтовые, гидравлические, рычажные, эксцентриковые), кроме того, специализированные установки для стыковой холодной сварки.

## 8. СВАРКА ТРЕНИЕМ

Сварка трением относится к процессам, в которых используются взаимное перемещение свариваемых поверхностей, давление и кратковременный нагрев. Сварка трением происходит в твердом состоянии при взаимном скольжении двух заготовок, сжатых силой  $P$ . Работа, совершаемая силами трения при скольжении, превращается в теплоту, что приводит к интенсивному нагреву трущихся поверхностей. Трение поверхностей осуществляется вращением или возвратно-поступательным перемещением сжатых заготовок (рис. 5.40). В результате нагрева и сжатия происходит совместная пластическая деформация. Сварное соединение образуется вследствие возникновения металлических связей между чистыми (ювенильными) контактирующими поверхностями свариваемых заготовок. Оксидные пленки на соединяемых поверхностях разрушаются в результате трения и удаляются за счет пластической деформации в радиальных направлениях.

Основные параметры сварки трением: скорость относительного перемещения свариваемых поверхностей, продолжительность нагрева, удельное усилие, пластическая деформация, т. е. осадка. Требуемый для сварки нагрев обусловлен скоростью вращения и осевым усилием. Для получения качественного соединения в конце процесса необходимо быстрое прекращение движения и приложение повышенного давления. Параметры режима сварки трением зависят от свойств свариваемого металла, площади сечения и конфигурации изделия. Сваркой трением соединяют однородные и разнородные металлы и сплавы с различными свойствами, например медь со сталью, алюминий с титаном и др. На рис. 5.41 показаны основные типы соединений, выполняемых сваркой трением. Соединение получают с достаточно высокими механическими свойствами. В про-

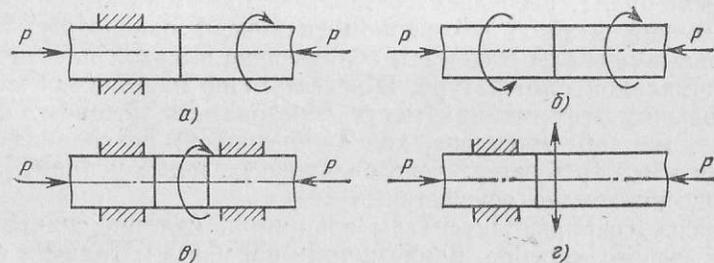


Рис. 5.40. Схемы сварки трением:  
 а — с вращением одной детали; б — с вращением обеих деталей; в — с вращающейся вставкой; г — с возвратно-поступательным движением одной детали

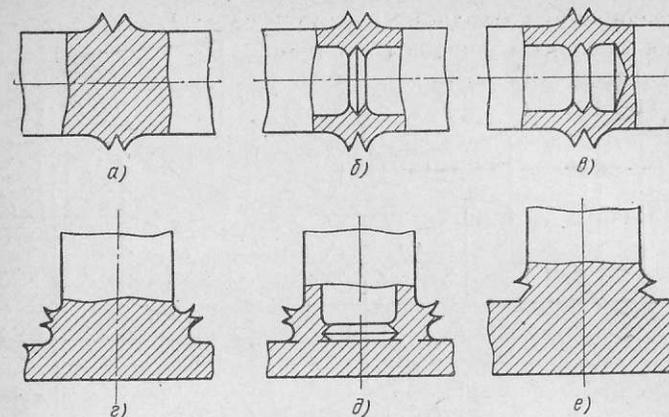


Рис. 5.41. Типы сварных соединений сварки трением:  
 а — сварка стержня встык; б — сварка труб встык; в — сварка встык стержня с трубой;  
 г — приварка стержня к листу; д — приварка трубы к листу; е — приварка стержня к массивной детали

мышленности сварку трением применяют при изготовлении режущего инструмента, различных валов, штоков с поршнями, пуансонов и т. п. При сварке трением по сравнению с контактной стыковой сваркой снижаются затраты энергии (в 5—10 раз) и требуемые мощности.

Для сварки трением выпускают серийные машины МСТ-23, МСТ-35 и МСТ-41 мощностью 10, 20 и 40 кВт; в виде исключения после соответствующей реконструкции используют обычные металлорежущие станки (токарные, фрезерные, сверлильные).

## 9. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ СВАРКА

Ультразвуковая сварка относится к процессам, в которых используют давление, нагрев и взаимное трение свариваемых поверхностей. Силы трения возникают в результате действия на заготовки, сжатые осевой силой  $P$ , механических колебаний с ультразвуковой частотой. Для получения механических колебаний высокой частоты используют магнитострикционный эффект, основанный на изменении размеров некоторых материалов под действием переменного магнитного поля. Изменения размеров магнитострикционных материалов очень незначительны, поэтому для увеличения амплитуды и концентрации энергии колебаний и для передачи механических колебаний к месту сварки используют волноводы, в большинстве случаев сужающейся формы.

При ультразвуковой сварке (рис. 5.42) свариваемые заготовки 5 размещают на опоре 6. Наконечник 4 рабочего инструмента 3 соединен с магнитострикционным преобразователем 1 через трансформатор 2 продольных упругих колебаний, представляющих собой вместе с рабочим инструментом волновод. Нормальная сжимающая сила  $P$

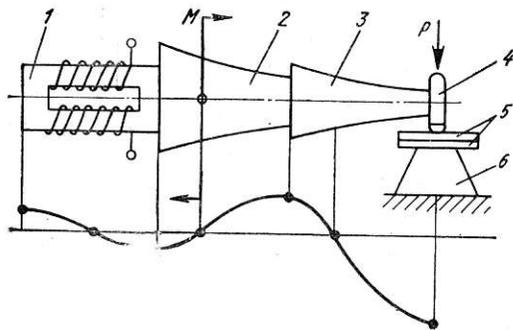


Рис. 5.42. Схема ультразвуковой сварки

создается моментом  $M$  в узле колебаний. В результате ультразвуковых колебаний в тонких слоях контактирующих поверхностей создаются сдвиговые деформации, разрушающие поверхностные пленки.

Тонкие поверхностные слои металла нагреваются, металл в этих слоях немного размягчается и под действием сжимающего усилия пластически деформируется. При сближении поверхностей на расстоянии действия межатомных сил между ними возникает прочная связь. Сравнительно небольшое тепловое воздействие на свариваемые материалы обеспечивает минимальное изменение их структуры, механических и других свойств. Например, при сварке меди температура в зоне контакта не превышает  $600^\circ\text{C}$ , а при сварке алюминия  $200\text{--}300^\circ\text{C}$ . Это особенно важно при сварке химически активных металлов.

Ультразвуковой сваркой можно получать точечные и шовные соединения внахлестку, а также соединения по замкнутому контуру. При сварке по контуру, например, по кольцу, в волновод вставляют конический штифт, имеющий форму трубки. При равномерном поджатии заготовок к свариваемому штифту получают герметичное соединение по всему контуру (рис. 5.43). Ультразвуковой сваркой можно сваривать заготовки толщиной до 1 мм и ультратонкие заготовки толщиной до 0,001 мм, а также приваривать тонкие листы и фольгу к заготовкам неограниченной толщины. Снижение требований к качеству свариваемых поверхностей позволяет сваривать лакированные и оксидированные поверхности и металлические изделия, покрытые различными изоляционными пленками. Этим способом можно сваривать металлы в однородных и разнородных сочетаниях, например алюминий с медью, медь со сталью и т. п. Ультразвуковым способом сваривают и пластмассы, однако в отличие от сварки металлов к заготовкам подводятся поперечные ультразвуковые колебания.

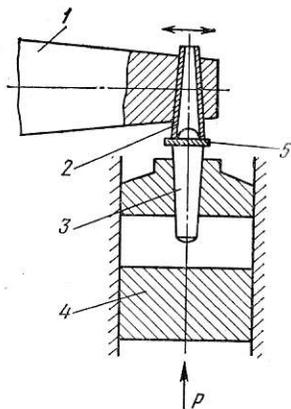


Рис. 5.43. Ультразвуковая сварка по контуру:

1 — волновод; 2 — сменный полый штифт; 3 — сменный прижимной штифт; 4 — прижимная опора; 5 — свариваемое изделие

В нашей стране выпускают ультразвуковые машины типа УЗСМ-1 и УЗСМ-2.

Ультразвуковую сварку применяют в приборостроении, радиоэлектронике, авиационной промышленности и других отраслях.

## 10. СВАРКА ВЗРЫВОМ

Сварку взрывом можно отнести к видам сварки с оплавлением при кратковременном нагреве на воздухе, так как на отдельных участках наблюдаются зоны металла, нагретые до оплавления. Однако на других участках температура может быть невысока, и здесь процесс приближается к холодной сварке.

Большинство технологических схем сварки основано на использовании направленного (кумулятивного) взрыва (рис. 5.44). Соединяемые поверхности двух заготовок 4 и 3, в частности пластин, одна из которых неподвижна и служит основанием, располагают под углом  $\alpha$  друг к другу на расстоянии  $h_0$ . На заготовку 3 укладывают взрывчатое вещество 2 толщиной  $H$ , а со стороны, находящейся над вершиной угла, устанавливают детонатор 1. Сваривают на жесткой опоре. Давление, возникающее при взрыве, сообщает импульс расположенной под зарядом пластине. Детонация взрывчатого вещества с выделением газов и теплоты происходит с большой скоростью (несколько тысяч метров в секунду).

В месте соударения метаемой пластины с основанием образуется угол  $\gamma$ , который перемещается вдоль соединяемых поверхностей. При соударении из вершины угла выдуваются тонкие поверхностные слои, оксидные пленки и другие загрязнения. Соударение пластин вызывает течение металла в их поверхностных слоях. Поверхности сближаются до расстояния действия межатомных сил взаимодействия, и происходит схватывание по всей площади соединения. Продолжительность сварки взрывом не превышает нескольких микросекунд. Этого времени недостаточно для протекания диффузионных процессов, сварные соединения не образуют промежуточных соединений между разнородными металлами и сплавами.

Прочность соединений, выполненных сваркой взрывом, выше прочности соединяемых материалов. Разрушение при испытании происходит на некотором расстоянии от плоскости соединения по наименее прочному металлу. Это объясняется упрочнением тонких слоев металла, прилегающих к соединенным поверхностям, при их пластической деформации.

Параметры сварки взрывом: скорость детонации  $D$ , нормаль-

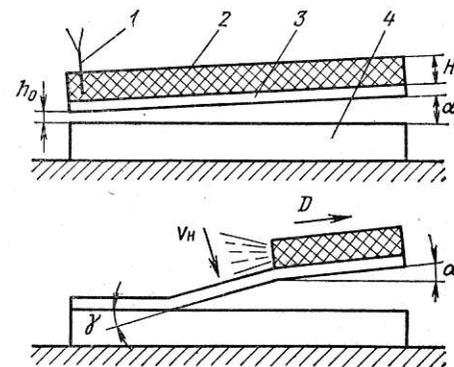


Рис. 5.44. Схема сварки взрывом

ная скорость  $v_n$  метаемой пластины при соударении с основанием и угол  $\gamma$  их встречи при соударении. Скорость детонации, определяемая типом взрывчатого вещества и толщиной его слоя, должна обеспечивать образование направленной (кумулятивной) струи без возникновения опасных для металла ударных волн.

Сварку взрывом используют при изготовлении заготовок для проката биметалла, плакирования поверхностей конструкционных сталей металлами и сплавами с особыми физическими и химическими свойствами, при сварке заготовок из разнородных материалов. Целесообразно сочетание сварки взрывом со штамповкой и ковкой.

## 11. ДИФфуЗИОННАЯ СВАРКА

При диффузионной сварке соединение образуется в результате взаимной диффузии атомов в поверхностных слоях контактирующих материалов, находящихся в твердом состоянии. Температура нагрева при сварке несколько выше или ниже температуры рекристаллизации более легкоплавкого материала. Диффузионную сварку в большинстве случаев выполняют в вакууме, однако она возможна в атмосфере инертных защитных газов. Свариваемые заготовки 3 (рис. 5.45) устанавливают внутри охлаждаемой металлической камеры 2, в которой создается вакуум  $133(10^{-3} \div 10^{-5})$  Па, и нагревают с помощью вольфрамового или молибденового нагревателя или индуктора ТВЧ 4 (5 — к вакуумному насосу; 6 — к высокочастотному генератору). Может быть использован также и электронный луч, позволяющий нагревать заготовки с еще более высокими скоростями, чем при использовании ТВЧ. Электронный луч применяют для нагрева тугоплавких металлов и сплавов. После того как достигнута требуемая температура, к заготовкам прикладывают с помощью механического 1, гидравлического или пневматического устройства небольшое сжимающее давление (1—20 МПа) в течение 5—20 мин. Такая длительная выдержка увеличивает площадь кон-

такта между предварительно очищенными свариваемыми поверхностями заготовок. Время нагрева определяется родом свариваемого металла, размерами и конфигурациями заготовок.

Для получения качественного соединения нагрев заготовок по всему сечению должен быть равномерным, а их поверхности очищены от оксидов и загрязнений. При нагреве в вакууме тончайшие адсорбированные и масляные пленки испаряются и не препятствуют образованию соединения.

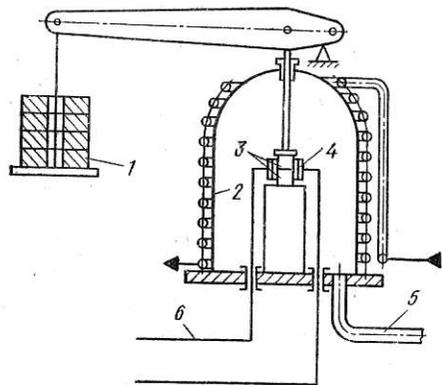


Рис. 5.45. Схема диффузионной сварки в вакууме

Преимуществом диффузионной сварки в вакууме является отсутствие припоев, электродов и флюсов. Металлы и сплавы можно соединять в однородных и разнородных сочетаниях, независимо от их твердости и взаимного смачивания, и получать прочные соединения без изменения физико-механических свойств. После сварки не требуется механической обработки для удаления шлака, графа или окалина.

Диффузионную сварку применяют в космической технике и радиоэлектронике, в самолетостроении, в приборостроении, в пищевой промышленности и других отраслях. Этот способ используют для сварки деталей и узлов вакуумных приборов, высокотемпературных нагревателей, при производстве инструмента и т. д.

Установки для диффузионной сварки выпускают для единичного производства с обычным ручным управлением и для серийного поточно-массового производства с полуавтоматическим или автоматическим программным управлением.

## ГЛАВА IV. НАНЕСЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ И ЖАРОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

### 1. НАПЛАВКА

Наплавка — процесс, при котором на поверхность детали наносится слой металла требуемого состава. Наплавку применяют при ремонте изношенных деталей для восстановления их исходных размеров и для изготовления новых изделий. Масса наплавленного металла обычно не превышает нескольких процентов от общей массы изделия. Проплавление основного металла и перемешивание основного и наплавленного металлов должно быть минимальным для сохранения механических свойств наплавленного слоя.

Для наплавочных работ создано большое количество различных сплавов, которые можно разделить на следующие основные группы: стали (углеродистые, легированные); сплавы на основе железа (высокохромистые чугуны, сплавы с бором и хромом, сплавы с кобальтом, молибденом или вольфрамом); сплавы на основе никеля и кобальта; сплавы на основе меди; карбидные сплавы (с карбидом вольфрама или хрома). Разработано ~70 марок наплавочных электродов, кроме того, можно применять электроды общего назначения.

Ручная дуговая наплавка металлическими электродами — самый простой способ. Наплавку выполняют короткой дугой на минимальном токе. Для повышения производительности применяют наплавку пучком электродов и трехфазной дугой.

Автоматическая наплавка под флюсом обеспечивает довольно большой объем ванны жидкого флюса и металла. Крупные детали наплавляют многодуговой наплавкой, при этом один рабочий управляет одновременно несколькими аппаратами, каждый из которых обрабатывает определенный участок изделия.

Применяют многоэлектродную наплавку, когда плавятся одновременно несколько электродных проволок, подключенных к одному полюсу источника тока и расположенных поперек оси наплавленного

валика. Под флюсом создается одна общая сварочная ванна, и электроды плавятся поочередно. Вместо электродной проволоки в качестве присадочного материала можно использовать ленту небольшой толщины и большой ширины. Дуга, перебегая от одного края ленты к другому, равномерно оплавляет ее торец. Коэффициент наплавки получается больше, а глубина проплавления и доля основного металла меньше.

Электрошлаковую наплавку применяют, когда необходимо наплавить большое количество металла. Преимущество электрошлаковой наплавки — высокая производительность, малая склонность наплавленного слоя к порам и трещинам, высокое качество поверхности наплавки. Толщина наплавленного слоя не менее 20 мм.

Наплавку ТВЧ выполняют с помощью индукционного нагрева с присадочным металлом, который предварительно наносят на поверхность изделия в виде смеси порошков, литого кольца или прессованного брикета, либо расплавляют в огнеупорной воронке, расположенной над наплаваемой деталью.

Дуговую наплавку неплавящимся электродом применяют в основном для твердых зернистых и порошковых сплавов. Дуговую наплавку вольфрамовым электродом в защитных газах (аргоне) выполняют, используя литые присадочные прутки (обычно из сплавов никеля и кобальта). Указанным способом получают очень малую глубину проплавления и тонкие слои.

Существует много разновидностей наплавки с использованием плазменной дуги, газового пламени, плавящегося электрода в защитном газе, порошковой проволоки и пластинчатого электрода.

## 2. МЕТАЛЛИЗАЦИЯ

Металлизация заключается в нанесении металлического покрытия на поверхность методом осаждения на ней жидкого металла, распыляемого газовой струей. Процесс металлизации состоит в подаче металлической проволоки к источнику нагрева. Проволока нагревается до расплавления, и жидкий металл под давлением газовой струи вылетает с большой скоростью из сопла металлизатора в виде распыленных капель, которые ударяются о поверхность детали и, соединяясь с ней, образуют слои покрытия.

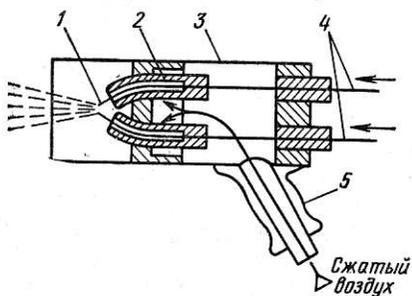


Рис. 5.46. Схема дугового металлизатора

В зависимости от используемого источника теплоты различают металлизацию дуговую, газовую, плазменную и ТВЧ. При дуговой металлизации используют специальные металлизационные аппараты (рис. 5.46). Через два направляющих мундштука 2, по которым протекает сварочный ток, подают проволоки 4. При соприкосновении проволок в точке 1

в результате короткого замыкания появляется дуговой разряд и образуются капли металла, увлекаемые струей сжатого воздуха, поступающего в корпус 3 через рукоятку 5.

Для металлизации применяют проволоки медные, алюминиевые, стальные и цинковые, а также неметаллические материалы в виде порошков (стекла, эмали, пластмасс). Металлизационный слой состоит из мелких поверхностно-окисленных частичек металла и имеет меньшую прочность и плотность по сравнению с наплавленным слоем. Металлизацию применяют для защиты от изнашивания, коррозии, а также в декоративных целях для таких изделий, как цистерны, бензобаки, мосты, изнашивающиеся части валов, деталей машин и т. п.

## ГЛАВА V. ТЕХНОЛОГИЯ СВАРКИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

### 1. СВАРИВАЕМОСТЬ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Ряд сталей, цветных и тугоплавких металлов обладает пониженной свариваемостью, которая проявляется в изменении механических или физико-химических свойств металла в зоне сварного соединения по сравнению с основным металлом и в образовании сварочных дефектов в виде трещин, пор и т. п.

Прочность и твердость шва, как правило, ниже, чем у основного металла. Это объясняется тем, что для предотвращения дефектов в сварном шве сварку многих сталей и сплавов выполняют менее легированными сварочными материалами, чем основной металл. Крупнозернистая литая структура обуславливает пониженную пластичность шва. Пониженная пластичность может быть также связана с повышенным содержанием газов.

Зона термического влияния (з. т. в.) представляет собой участок сварного соединения, прилегающий к шву, в котором под действием нагрева происходят структурные изменения: укрупняется зерно, оплавляются границы зерен, в сплавах с полиморфными превращениями возможно образование микроструктуры закалочного типа. В результате этих изменений возможно резкое повышение твердости и снижение пластичности (рис. 5.47).

Для металлов с пониженной свариваемостью характерно образование горячих или холодных трещин в шве и з. т. в. (рис. 5.48). Причины возникновения трещин: снижение прочности и пластичности как в процессе формирования сварного соединения, так и в послесварочный период вследствие особенностей агрегатного состояния, полиморфных превращений и насыщения газами; развитие сварочных деформаций и напряжений, вызывающих разрушение металла, если они превышают его пластичность и прочность.

Возникновение собственных сварочных напряжений (т. е. без приложения внешних сил) происходит следующим образом. Вследствие неравномерного разогрева изделия при сварке (рис. 5.49, а)

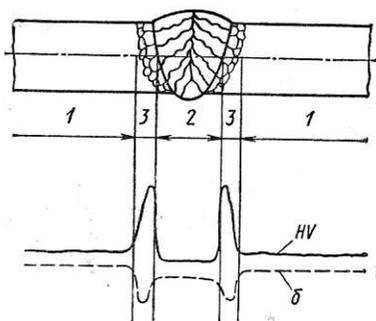


Рис. 5.47. Неоднородность механических свойств различных зон сварного соединения легированной стали: 1 — основной металл; 2 — шов; 3 — зона термического влияния;  $HV$  — твердость;  $\delta$  — пластичность (относительное удлинение)

температурные деформации шва и з. т. в. ограничиваются реакцией менее нагретых зон основного металла. Вместо удлинения отдельных слоев свариваемого металла в соответствии с зависимостью  $+\alpha_T T$  ( $\alpha_T$  — температурный коэффициент металла;  $T$  — максимальная температура нагрева слоя) происходит равномерное удлинение всей свариваемой пластины, в результате чего грань пластины 1 в момент максимального разогрева занимает положение 2. Поэтому шов и прилегающая к нему зона металла при нагреве претерпевают местную пластическую деформацию сжатия, пропорциональную заштрихованной площади 3. Таким образом, к началу охлаждения эти зоны кажутся укороченными (рис. 5.49, б). После охлаждения и обратной температурной деформации они должны были бы занять положение в соответствии с зависимостью  $-\alpha_T T$ . Однако их температурная деформация снова ограничивается реакцией основного металла. В ре-

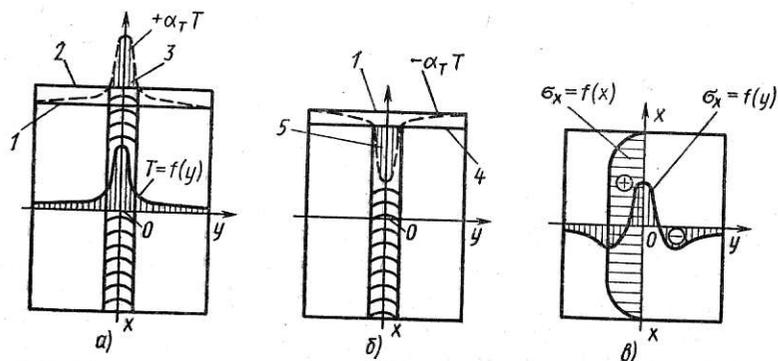


Рис. 5.49. Процесс возникновения сварочных напряжений при сварке пластин встык,  $T = f(y)$  — распределение температуры по оси  $oy$ ;  $\sigma_x = f(x)$  и  $\sigma_y = f(y)$  — распределение остаточных продольных напряжений по осям  $Ox$  и  $Oy$  соответственно

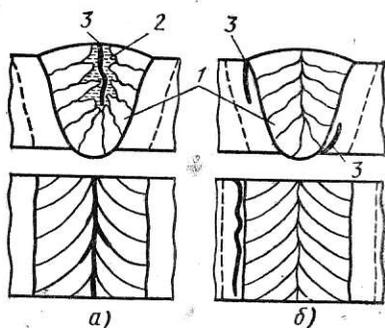


Рис. 5.48. Вид трещин в сварных соединениях: а — горячих; б — холодных: 1 — столбчатые кристаллиты; 2 — расположение жидких прослоек при завершении кристаллизации шва; 3 — трещины

ультате произойдет равномерное укорочение всей пластины и грань пластины 1 займет положение 4. Поскольку шов и зона термического влияния связаны с основным металлом, то они претерпевают внутреннюю упругопластическую деформацию растяжения, пропорциональную заштрихованной площади 5. Соответствующие упругой деформации растягивающие напряжения (+) в шве и зоне термического влияния уравниваются сжимающими напряжениями (—) в основном металле (рис. 5.49, в).

Внешние наблюдаемые деформации сварных заготовок (например, укорочение пластины после сварки, соответствующее смещение ее грани 1 в положение 4) не совпадают с внутренними упругопластическими деформациями, а их величины противоположны: чем больше внешние деформации, тем меньше внутренние деформации. Величина и знак собственных сварочных напряжений определяются внутренними деформациями.

Снижение внутренних деформаций и напряжений — один из путей предупреждения трещин. Для этого необходимо уменьшить реакцию основного металла на разогреваемые до высоких температур шов и зону термического влияния. Следует уменьшить геометрическую жесткость свариваемых заготовок, исключить их закрепление при сварке, а также применить предварительный подогрев для выравнивания температур по объему заготовки. Сварочные напряжения снимаются также немедленно после сварки высоким отпуском. В то же время методы снижения внутренних деформаций и напряжений (кроме отпуска) приводят к увеличению внешних деформаций сварной заготовки. Для устранения последних, наоборот, необходимо увеличение жесткости заготовок (постановка ребер, мембран и т. п.) или закрепление их при сварке. Выбор условий сварки определяется тем, что в данном случае опасней — трещины или коробление заготовки.

Горячие трещины образуются в период кристаллизации сварного шва, когда металл находится в двухфазном твердо-жидком состоянии. В этом состоянии металл имеет очень малые прочность и пластичность. В результате развития внутренних деформаций растяжения возможно разрушение по незатвердевшему жидким прослойкам между кристаллитами. Как правило, горячие трещины образуются вдоль оси сварных швов в зоне стыка столбчатых кристаллитов, где завершается кристаллизация шва (рис. 5.49, а). Склонность к горячим трещинам повышается при наличии в металле шва вредных примесей, которые обладают повышенной способностью к ликвации и образованию легкоплавких соединений. Последнее равносильно увеличению интервала кристаллизации, т. е. времени пребывания металла в двухфазном состоянии.

Холодные трещины чаще всего возникают в з. т. в. после полного затвердевания сварного шва в период окончания охлаждения или последующего вылеживания сварной конструкции в течение нескольких суток (рис. 5.49, б). Холодные трещины характерны для сплавов, претерпевающих при сварке закалку, усиленный рост зерна, повышенное насыщение газами, особенно водородом. Эти процессы

проводят к понижению прочности и пластичности металла, т. е. к его охрупчиванию. Если сварочные напряжения превышают прочность металла в указанном состоянии, то образуются холодные трещины.

Поры в сварных швах образуются в процессе кристаллизации сварного шва в результате выделения газов из пересыщенного газом затвердевающего металла. Причины появления пор: насыщение жидкого металла сварочной ванны газами вследствие повышенной влажности электродных покрытий, флюсов, защитных газов (водородом), нарушения защиты (азотом) и интенсивных окислительных процессов в шве (окислом углерода); охлаждение сварных швов при кристаллизации с большой скоростью, вследствие чего затрудняется выход пузырьков газа из кристаллизующегося шва в атмосферу.

## 2. СВАРКА УГЛЕРОДИСТЫХ И ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Низкоуглеродистые и низколегированные стали обладают хорошей свариваемостью и соединяются большинством способов сварки без особых трудностей.

Углеродистые и легированные стали с содержанием углерода более 0,3 % (стали 45, 30ХГСА, 40ХНМА и др.) при типовых режимах сварки претерпевают закалку в з. т. в.

Соответствующие этим режимам скорости охлаждения для указанных сталей достаточно высоки и приводят к образованию мартенситной микроструктуры. Поэтому для сварных соединений этих сталей характерны повышенная твердость и пониженная пластичность в з. т. в.

В жестких сварных узлах, в которых образуются высокие сварочные напряжения, в закаленной з. т. в. возможно образование холодных трещин. Склонность к холодным трещинам повышается при насыщении металла водородом, который снижает пластичность закаленного металла. Источником водорода служит влага в покрытиях электродов, флюсах и защитных газах, которая разлагается в дуге, и атомарный водород насыщает жидкий металл сварочной ванны. В результате диффузии водорода им насыщается также з. т. в.

Для обеспечения хорошей свариваемости при дуговой сварке этих сталей рекомендуют следующие технологические мероприятия: предварительный и последующий подогрев заготовок до температуры 100—300 °С в целях замедленного охлаждения и исключения закалки з. т. в.; прокалка электродов, флюсов при температуре 400—450 °С в течение 3 ч и осушение защитных газов для предупреждения попадания водорода в металл сварного соединения; низкий (300—400 °С) или высокий (600—700 °С) отпуск сварных соединений сразу после окончания сварки в целях повышения пластичности закалочных структур и удаления водорода.

Контактную точечную сварку углеродистых и легированных сталей выполняют на мягких режимах, т. е. длительным нагревом током и быстрым удалением заготовок из машины для избежания

отвода теплоты электродами. В результате обеспечивается замедленное охлаждение заготовок. Контактную стыковую сварку этих сталей выполняют с прерывистым оплавлением, при котором обеспечиваются подогрев заготовок перед сваркой и замедленное охлаждение.

## 3. СВАРКА ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ СТАЛЕЙ

Коррозионная стойкость стали обеспечивается содержанием более 12 % Cr, а содержание 8 % Ni стабилизирует аустенитную структуру и сохраняет ее при нормальных температурах (сталь 10X18H9T и др.). При сварке этих сталей на режимах, обуславливающих продолжительное пребывание металла в области температур 500—800 °С, возможна потеря коррозионной стойкости металлом шва и з. т. в. Причиной этого является образование карбидов хрома на границах зерен и обеднение приграничных участков зерен хромом. В результате металл сварного соединения становится склонным к так называемой межкристаллитной коррозии.

При дуговой сварке для предупреждения межкристаллитной коррозии сварных соединений рекомендуются сварка на малых погонных энергиях ( $q/v$ , Дж/см) с применением теплоотводящих медных подкладок в целях получения жестких термических циклов и уменьшения времени пребывания металла при высоких температурах; термическая обработка после сварки: нагрев до температуры 1100 °С и закалка в воду. При нагреве происходит растворение карбидов, а закалка фиксирует чисто аустенитную структуру.

При дуговой сварке аустенитных сталей возможно образование в сварных швах горячих трещин. Они обусловлены широким интервалом кристаллизации вследствие повышенного содержания легирующих элементов и наличия вредных примесей (S). Образованию трещин способствует также крупнозернистая столбчатая макроструктура шва, при которой его кристаллизация завершается при наличии жидких прослоек большой протяженности.

Для предупреждения возникновения горячих трещин в сварных швах рекомендуется вводить в сварочные материалы (электроды, проволоку) легирующие элементы Si, Al, Mo, Mn и другие способствующие измельчению зерна, и снижать содержание вредных примесей.

Аустенитные стали хорошо свариваются контактной сваркой. Сварку ведут на пониженных плотностях тока. Эти стали имеют высокое удельное электросопротивление и низкую теплопроводность, что обуславливает выделение большого количества теплоты при сварке и ограниченный его отвод из зоны сварного соединения. При этом применяют повышенное давление, поскольку аустенитные стали имеют значительную прочность при высоких температурах.

## 4. СВАРКА ЧУГУНА

Чугун относится к категории плохо сваривающихся сплавов. Его сваривают при исправлении дефектов в отливках и ремонте деталей. Дуговая сварка чугуна чугунными электродами и с покры-

тиями не обеспечивает хорошего качества сварных соединений. Металл шва получает структуру белого чугуна, а зона термического влияния закаливается.

Горячую сварку чугуна выполняют с предварительным подогревом свариваемых деталей до температуры 400—700 °С. Детали подогревают в печах. Перед сваркой в деталях вырубают дефектные места и разделяют кромки, которые затем заформовывают с помощью графитных пластин и кварцевого песка, замешанного на жидком стекле. Сваривают чугунными электродами (диаметром 8—25 мм) со стабилизирующей или специальной обмазкой. Сваренные детали охлаждают вместе с печью. При горячей сварке чугуна получают сварное соединение без твердых отбеленных и закаленных участков. Однако горячая сварка — дорогой и трудоемкий процесс; ее применяют для ремонта уникальных деталей. Горячую сварку также выполняют науглероживающим газовым пламенем с флюсом на основе буры ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ).

При холодной сварке чугун сваривают без подогрева стальными, медножелезными, медноникелевыми электродами и электродами из аустенитного чугуна. В случае применения стальных электродов валики наплавляют низкоуглеродистыми электродами небольшого диаметра со стабилизирующей или качественной обмазкой. Применяют также стальные электроды со специальным покрытием, содержащим большое количество карбидообразующих элементов, дающим наплавленный металл с мягкой основой и вкраплениями карбидов. Эти способы не исключают образования отбеленных и закалочных структур в з. т. в., но они просты и обеспечивают мягкий хорошо обрабатываемый шов.

Медно-железные электроды состоят из медного прутка с оплеткой из жести или пучка из медных и стальных стержней. Электроды имеют специальное или стабилизирующее покрытие. Медно-никелевые электроды состоят из стержней монель-металла (70 % Ni, 28 % Cu и остальное Fe) или мельхиора (80 % Cu, 20 % Ni) со стабилизирующей обмазкой. Применение медно-железных и медно-никелевых электродов позволяет получить сварное соединение, у которого отбеливание в з. т. в. наблюдается только на отдельных участках. Наибольшее применение имеют медно-железные электроды, как более дешевые и обеспечивающие достаточную прочность металла шва.

## 5. СВАРКА МЕДИ И ЕЕ СПЛАВОВ

На свариваемость меди большое влияние оказывают содержащиеся в ней вредные примеси ( $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{Pb}$  и др.). Кислород, находящийся в меди в виде оксида  $\text{Cu}_2\text{O}$ , является одной из причин образования *горячих трещин* в сварных швах. Двуоксид меди образует с медью легкоплавкую эвтектику ( $\text{Cu}_2\text{O}-\text{Cu}$ ), которая располагается по границам кристаллитов и снижает температуру их затвердевания. Такое же действие оказывают  $\text{V}$  и  $\text{Pb}$ . Наличие сетки эвтектики по границам кристаллитов делает шов более хрупким при нормальных температурах.

В расплавленной меди водород имеет высокую растворимость, которая резко понижается при кристаллизации. Выделение водорода при затвердевании сварочной ванны может привести к образованию *газовой пористости*. Водород, оставшийся в растворенном состоянии в твердом металле, вступает в реакцию с двуоксидом меди, в результате чего выделяются водяные пары ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Последние не растворяются в меди и скапливаются под высоким давлением в микропустотах, что приводит к так называемой *водородной хрупкости*. Водородная хрупкость может привести к образованию трещин в твердом металле в процессе охлаждения.

Для предотвращения указанных дефектов при дуговой сварке меди рекомендуются сварка в атмосфере защитных газов (аргона, гелия, азота и их смесей); применение сварочной и присадочной проволоки, содержащих сильные раскислители (титан, цирконий, бор, фосфор, кремний и др.).

Поскольку медь обладает высокой теплопроводностью сварку ее выполняют на повышенной погонной энергии  $q/v$ , а при толщине более 4 мм — с предварительным подогревом до температуры 300 °С. Медь большой толщины (свыше 30 мм) сваривают плазменной сваркой. В единичном производстве и для ремонтных работ применяют газовую сварку мощным пламенем. При этом обеспечивается необходимый подогрев заготовок. Сварку выполняют с флюсом на основе буры, который наносят на кромки заготовок и на присадочный пруток. Флюс растворяет  $\text{Cu}_2\text{O}$  и выводит его в шлак. Медь толщиной более 50 мм сваривают электрошлаковой сваркой.

Основная трудность при сварке латуней — *испарение цинка*. В результате снижается прочность и коррозионная стойкость латунных швов. Пары цинка ядовиты, поэтому необходима интенсивная вентиляция или сварщики должны работать в специальных масках. При сварке в защитных газах преимущественно применяют сварку неплавящимся вольфрамовым электродом, так как при этом происходит меньшее испарение цинка, чем при использовании плавящегося электрода. При газовой сварке лучшие результаты получают при применении газового флюса. Образующийся на поверхности сварочной ванны борный ангидрид ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) связывает пары цинка в шлак. Сплошной слой шлака препятствует выходу паров цинка из сварочной ванны. Латунь обладает меньшей теплопроводностью, чем медь, поэтому для металла толщиной свыше 12 мм необходим подогрев до температуры 150 °С.

Для сварки бронзы применяют те же способы и технологию, что и для сварки меди, за исключением оловянных бронз. Их сваривают с большой скоростью и без подогрева, так как в противном случае возможно выплавление легкоплавкой составляющей — олова.

Латуни и бронзы имеют более высокое удельное электросопротивление, чем медь, и они достаточно хорошо свариваются контактной сваркой. Медь контактной сваркой не сваривается.

## 6. СВАРКА АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ

Трудности при сварке алюминия и его сплавов обусловлены образованием тонкой прочной и тугоплавкой поверхностной пленки оксида  $Al_2O_3$ , плавящегося при температуре  $2050^\circ C$ ; склонностью к образованию газовой пористости; склонностью к образованию горячих трещин.

Пленка оксида покрывает капли расплавленного металла и препятствует сплавлению их между собой и основным металлом. Для разрушения и удаления пленки и защиты металла от повторного окисления при сварке используют специальные флюсы или ведут сварку в атмосфере инертных газов. Флюсы состоят из смеси хлористых и фтористых солей щелочноземельных металлов ( $NaCl$ ,  $KCl$ ,  $BaCl_2$ ,  $LiF$ ,  $CaF_2$  и др.). Действие флюсов основано на растворении пленки оксидов. При сварке в защитных газах пленка разрушается в результате электрических процессов в том случае, если она оказывается в катодной области дуги. Это реализуется при сварке плавящимся электродом на постоянном токе обратной полярности и сварке неплавящимся электродом на переменном токе с использованием специальных источников тока (см. разд. 5, гл. II, п. 6).

Причиной газовой пористости в сварных швах алюминия является водород. Источник водорода — влага воздуха, которая сильно адсорбируется пленкой оксида на поверхности заготовки и сварочной проволоке. Газовая пористость обусловлена с одной стороны насыщением расплавленного металла большим количеством водорода, с другой — малой его растворимостью в твердом состоянии. Для предупреждения пористости необходима тщательная механическая очистка свариваемой поверхности заготовок и сварочной проволоки или химическая очистка (например, раствором  $NaOH$ ). При этом с пленкой оксида удаляется скопившаяся на ней влага.

Образование горячих трещин в алюминии и некоторых его сплавах связано с крупнокристаллитной макроструктурой сварных швов. Склонность к трещинам увеличивается при наличии небольшого количества  $Si$  (до  $0,5\%$ ), который приводит к образованию легкоплавкой эвтектики по границам кристаллитов. Борьба с горячими трещинами ведется металлургическим путем. В шов через проволоку вводят  $Fe$ , нейтрализующий вредное влияние  $Si$ , и модификаторы  $Zr$ ,  $Ti$  и  $B$ , способствующие измельчению кристаллитов в шве.

Наиболее трудно свариваются термически упрочняемые сплавы системы  $Al-Cu-Mg$  (дуралюмины). При нагреве свыше  $500^\circ C$  происходит оплавление границ зерен с образованием на расплавленных участках эвтектических выделений. После затвердевания эвтектика имеет пониженные механические свойства, что приводит к охрупчиванию з. т. в. и снижению ее прочности по сравнению с прочностью основного металла. Свойства з. т. в. не восстанавливаются термической обработкой.

Относительно хорошо свариваются термически не упрочняемые сплавы системы  $Al-Mn$  (сплав  $AMc$ ) и системы  $Al-Mg$  (сплавы  $AMr$ ).

Наиболее широко применяют сварку алюминия и его сплавов в атмосфере защитных газов неплавящимся (толщины  $0,5-10$  мм) и плавящимся (толщины более  $10$  мм) электродом. В этом случае получают более высокое качество сварных швов по сравнению с другими видами дуговой сварки. Применяют также автоматическую сварку плавящимся электродом полуоткрытой дугой по слою флюса, при которой для формирования корня шва используют медные или стальные подкладки. Возможна газовая (ацетилено-кислородная) сварка алюминия и его сплавов. Флюс наносят на свариваемые кропки в виде пасты или вводят в сварочную ванну на разогретом конце присадочного прутка. Алюминий и его сплавы также сваривают плазменной и электрошлаковой сваркой; они достаточно хорошо свариваются контактной сваркой. Учитывая высокую теплопроводность и электропроводность алюминия, для его сварки необходимо применять большие силы тока.

## 7. СВАРКА ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Трудности при сварке тугоплавких металлов  $Ti$ ,  $Zr$ ,  $Mo$ ,  $Nb$  и других связаны с тем, что они при нагреве интенсивно поглощают газы — кислород, водород и азот. При этом даже незначительное содержание газов приводит к резкому снижению пластических свойств этих металлов.

$Ti$  и  $tan$  и его сплавы сваривают в защитной атмосфере аргона высшего сорта. При этом дополнительно защищают струями 1 и 2 аргона корень шва и еще не остывший до температуры  $350^\circ C$  участок шва 3 (рис. 5.50). Перед сваркой проволоку и основной металл дегазируют путем отжига в вакууме. Допустимое количество газов в швах составляет  $H_2 < 0,01\%$ ,  $O_2 < 0,1\%$  и  $N_2 < 0,05\%$ . При большем содержании газов снижается пластичность металла сварных соединений, кроме того, титановые сплавы становятся склонными к образованию холодных трещин. Ответственные узлы сваривают в камерах с контролируемой аргоновой атмосферой, в том числе и обитаемых, в которых сварщики работают в скафандрах.

Для сварки титана и его сплавов также применяют плазменную и электронно-лучевую сварку.

Цирконий весьма близок по свариваемости к титану. Поэтому его сваривают по аналогичной технологии.

Молибден и ниобий и их сплавы более чувствительны к насыщению газами, чем титан, особенно кислородом. При содержании кислорода более  $0,01\%$  их пластические свойства резко снижаются. Молибден и ниобий и их сплавы сваривают дуговой сваркой в камерах с контролируемой аргоновой атмосферой или электронно-лучевой сваркой в вакууме.

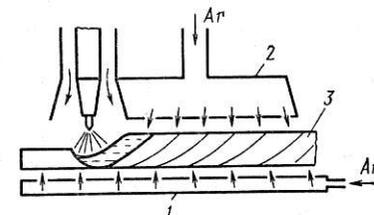


Рис. 5.50. Горелка с удлиненной насадкой для аргонодуговой сварки титана

1. СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПАЙКИ

Пайкой называется процесс получения неразъемного соединения заготовок с нагревом ниже температуры их автономного расплавления путем смачивания, растекания и заполнения зазора между ними расплавленным припоем и сцепления их при кристаллизации шва. Образование соединения без расплавления основного металла обеспечивает возможность распая изделия.

По прочности паяные соединения уступают сварным. Паять можно углеродистые и легированные стали всех марок, твердые сплавы, цветные металлы, серые и ковкие чугуны. При пайке металлы соединяются в результате смачивания и растекания жидкого припоя по нагретым поверхностям и затвердевания его после охлаждения. Прочность сцепления припоя с соединяемыми поверхностями зависит от физико-химических и диффузионных процессов, протекающих между припоем и основным металлом.

По условию заполнения зазора пайку можно разделить на капиллярную и некапиллярную. По механизму образования шва капиллярная пайка подразделяется на пайку с готовым припоем, когда затвердевание шва происходит при охлаждении; контактно-реактивную пайку; реактивно-флюсовую; диффузионную. К некапиллярным способам относятся пайка-сварка и сварка-пайка.

При капиллярной пайке припой заполняет зазор между соединяемыми поверхностями и удерживается в нем за счет капиллярных сил (рис. 5.51). Соединение образуется за счет растворения основы в жидком припое и последующей кристаллизации раствора. Капиллярную пайку используют при соединении внахлестку.

При диффузионной пайке соединение образуется за счет взаимной диффузии компонентов припоя и паяемых материалов, причем возможно образование в шве твердого раствора или тугоплавких хрупких интерметаллидов. Для диффузионной пайки необходима продолжительная выдержка при температуре образования паяного

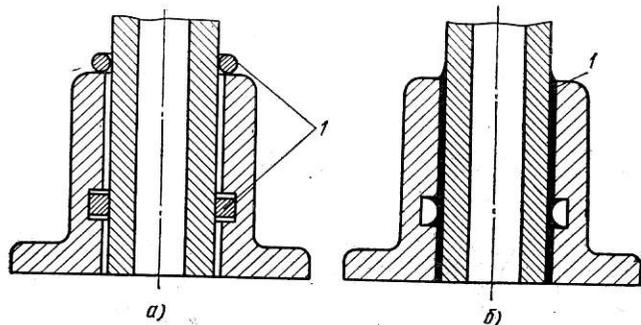


Рис. 5.51. Схема капиллярной пайки:  
а — перед пайкой; б — после пайки; 1 — припой

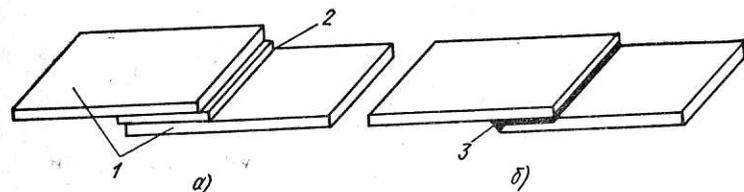


Рис. 5.52. Схема контактно-реактивной пайки:  
а — перед пайкой; б — после пайки; 1 — медь; 2 — серебро; 3 — эвтектический сплав меди с серебром

шва и после завершения процесса — при температуре ниже солидуса припоя.

При контактно-реактивной пайке между соединяемыми металлами или соединяемыми металлами и прослойкой промежуточного металла в результате контактного плавления образуется сплав, который заполняет зазор и при кристаллизации образует паяное соединение (рис. 5.52).

При реактивно-флюсовой пайке припой образуется за счет реакции вытеснения между основным металлом и флюсом. Например, при пайке алюминия с флюсом  $3ZnCl_2 + 2Al \rightleftharpoons 2AlCl_3 + 3Zn$  восстановленный цинк служит припоем. Реактивно-флюсовую пайку можно вести без припоя и с припоем.

При пайке-сварке соединение образуется так же, как при сварке плавлением, но в качестве присадочного металла применяют припой (рис. 5.53).

При сварке-пайке соединяют разнородные материалы с применением местного нагрева, при котором более легкоплавкий материал нагревается до температуры плавления и выполняет роль припоя.

Наибольшее применение получили капиллярная пайка и пайка-сварка. Диффузионная и контактно-реактивная пайки более трудоемки, но обеспечивают высокое качество соединения.

Качество паяных соединений (прочность, герметичность, надежность и др.) зависят от правильного выбора основного металла, припоя, флюса, способа нагрева, величины зазоров, типа соединения.

Припой — должен хорошо растворять основной металл, обладать смачивающей способностью, быть дешевым и недефицитным.

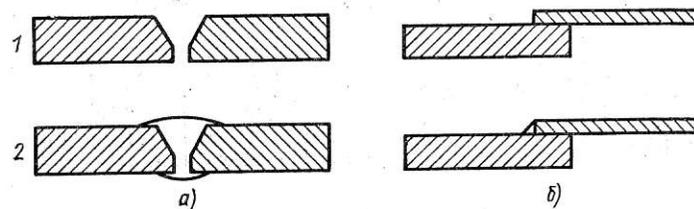


Рис. 5.53. Схема пайки-сварки:  
а — без оплавления кромок деталей; б — с оплавлением кромок одной детали; 1 — до пайки; 2 — после пайки

## ГЛАВА VI. ПАЙКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

### 1. СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПАЙКИ

Пайкой называется процесс получения неразъемного соединения заготовок с нагревом ниже температуры их автономного расплавления путем смачивания, растекания и заполнения зазора между ними расплавленным припоем и сцепления их при кристаллизации шва. Образование соединения без расплавления основного металла обеспечивает возможность распая изделия.

По прочности паяные соединения уступают сварным. Паять можно углеродистые и легированные стали всех марок, твердые сплавы, цветные металлы, серые и ковкие чугуны. При пайке металлы соединяются в результате смачивания и растекания жидкого припоя по нагретым поверхностям и затвердевания его после охлаждения. Прочность сцепления припоя с соединяемыми поверхностями зависит от физико-химических и диффузионных процессов, протекающих между припоем и основным металлом.

По условию заполнения зазора пайку можно разделить на капиллярную и некапиллярную. По механизму образования шва капиллярная пайка подразделяется на пайку с готовым припоем, когда затвердевание шва происходит при охлаждении; контактно-реактивную пайку; реактивно-флюсовую; диффузионную. К некапиллярным способам относятся пайка-сварка и сварка-пайка.

При капиллярной пайке припой заполняет зазор между соединяемыми поверхностями и удерживается в нем за счет капиллярных сил (рис. 5.51). Соединение образуется за счет растворения основы в жидком припое и последующей кристаллизации раствора. Капиллярную пайку используют при соединении внахлестку.

При диффузионной пайке соединение образуется за счет взаимной диффузии компонентов припоя и паяемых материалов, причем возможно образование в шве твердого раствора или тугоплавких хрупких интерметаллидов. Для диффузионной пайки необходима продолжительная выдержка при температуре образования паяного

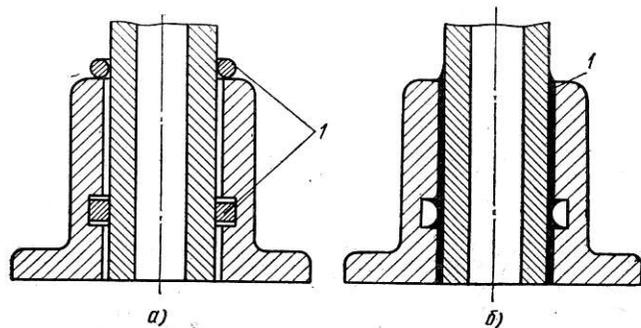


Рис. 5.51. Схема капиллярной пайки:  
а — перед пайкой; б — после пайки; 1 — припой

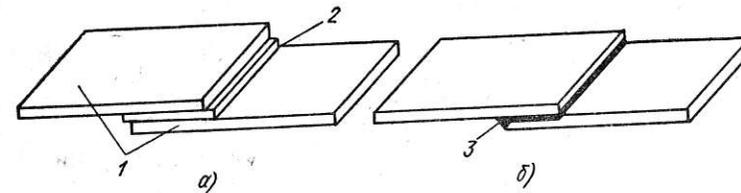


Рис. 5.52. Схема контактно-реактивной пайки:  
а — перед пайкой; б — после пайки; 1 — медь; 2 — серебро; 3 — эвтектический сплав меди с серебром

шва и после завершения процесса — при температуре ниже солидуса припоя.

При контактно-реактивной пайке между соединяемыми металлами или соединяемыми металлами и прослойкой промежуточного металла в результате контактного плавления образуется сплав, который заполняет зазор и при кристаллизации образует паяное соединение (рис. 5.52).

При реактивно-флюсовой пайке припой образуется за счет реакции вытеснения между основным металлом и флюсом. Например, при пайке алюминия с флюсом  $3ZnCl_2 + 2Al \rightleftharpoons 2AlCl_3 + 3Zn$  восстановленный цинк служит припоем. Реактивно-флюсовую пайку можно вести без припоя и с припоем.

При пайке-сварке соединение образуется так же, как при сварке плавлением, но в качестве присадочного металла применяют припой (рис. 5.53).

При сварке-пайке соединяют разнородные материалы с применением местного нагрева, при котором более легкоплавкий материал нагревается до температуры плавления и выполняет роль припоя.

Наибольшее применение получили капиллярная пайка и пайка-сварка. Диффузионная и контактно-реактивная пайки более трудоемки, но обеспечивают высокое качество соединения.

Качество паяных соединений (прочность, герметичность, надежность и др.) зависят от правильного выбора основного металла, припоя, флюса, способа нагрева, величины зазоров, типа соединения.

Припой — должен хорошо растворять основной металл, обладать смачивающей способностью, быть дешевым и недефицитным.

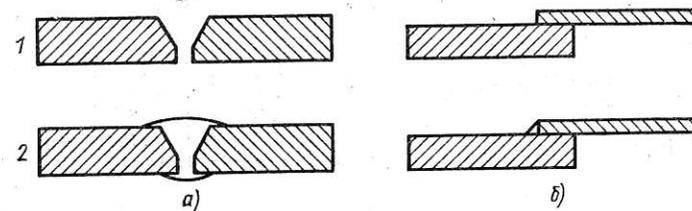


Рис. 5.53. Схема пайки-сварки:  
а — без оплавления кромок деталей; б — с оплавлением кромок одной детали; 1 — до пайки; 2 — после пайки

Припой представляют собой сплавы цветных металлов сложного состава. Все припои по температуре плавления подразделяют на особо легкоплавкие (температура плавления  $\leq 145^\circ\text{C}$ ), легкоплавкие (температура плавления  $145 \leq 450^\circ\text{C}$ ), среднеплавкие (температура плавления  $450 \leq 1100^\circ\text{C}$ ) и тугоплавкие (температура плавления  $> 1050^\circ\text{C}$ ). К особолегкоплавким и легкоплавким припоям относятся оловянно-свинцовые, на основе висмута, индия, кадмия, цинка, олова, свинца. К среднеплавким и высокоплавким припоям относятся медные, медно-цинковые, медно-никелевые, с благородными металлами (серебром, золотом, платиной). Припои изготавливают в виде прутков, проволок, листов, полос, спиралей, дисков, колец, зерен и т. д., укладываемых в место соединения.

Изделия из алюминия и его сплавов паяют с припоями на алюминийной основе с кремнием, медью, оловом и другими металлами. Магний и его сплавы паяют припоями на основе магния с добавками алюминия, меди, марганца и цинка. Изделия из коррозионно-стойких сталей и жаропрочных сплавов, работающих при высоких температурах (выше  $500^\circ\text{C}$ ), паяют тугоплавкими припоями на основе железа, марганца, никеля, кобальта, титана, циркония, гафния, ниобия и палладия.

Флюсы паяльные применяют для очистки поверхности паяемого металла, а также для снижения поверхностного натяжения и улучшения растекания и смачиваемости жидкого припоя. Флюс (кроме реактивно-флюсовой пайки) не должен химически взаимодействовать с припоем. Температура плавления флюса должна быть ниже температуры плавления припоя. Флюс в расплавленном и газообразном состоянии должен способствовать смачиванию поверхности основного металла расплавленным припоем. Флюсы могут быть твердые, пастообразные и жидкие. Для пайки наиболее применимы флюсы: бура  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  и борная кислота  $\text{H}_2\text{BO}_3$ , хлористый цинк  $\text{ZnCl}_2$ , фтористый калий  $\text{KF}$  и др.

## 2. СПОСОБЫ ПАЙКИ

Способы пайки классифицируют в зависимости от используемых источников нагрева. Наиболее распространены в промышленности пайка в печах, индукционная, погружением, газопламенная и паяльниками.

При пайке в печах соединяемые заготовки нагревают в специальных печах: электросопротивления, с индукционным нагревом, газопламенных и газовых. Припой заранее закладывают в шов собранного узла, на место пайки наносят флюс и затем изделие помещают в печь, где его нагревают до температуры пайки. Припой расплавляется и заполняет зазоры между соединяемыми заготовками. Процесс пайки продолжается несколько часов. Этот способ обеспечивает равномерный нагрев соединяемых деталей без заметной их деформации.

При индукционной пайке паяемый участок нагревают в индукторе. Через индуктор пропускают ТВЧ, в результате чего

место пайки нагревается до необходимой температуры. Для предохранения от окисления изделие нагревают в вакууме или в защитной среде с применением флюсов. Индуктор выполнен в виде петли или спирали из красной меди. Формы и размеры индуктора зависят от конструкции паяемого изделия.

Пайку погружением выполняют в ваннах с расплавленными солями или припоями. Соляная смесь обычно состоит из 55 %  $\text{KCl}$  и 45 %  $\text{HCl}$ . Температура ванны  $700\text{--}800^\circ\text{C}$ . На паяемую поверхность, предварительно очищенную от грязи и жира, наносят флюс, между кромками или около места соединения размещают припой, затем детали скрепляют и погружают в ванну. Соляная ванна предохраняет место пайки от окисления. Перед погружением в ванну с расплавленным припоем покрытые флюсом детали нагревают до температуры  $550^\circ\text{C}$ . Поверхности, не подлежащие пайке, предохраняют от контакта с припоем специальной обмазкой из графита с добавками небольшого количества извести. Пайку погружением в расплавленный припой используют для стальных, медных и алюминиевых сплавов, деталей сложных геометрических форм. На этот процесс расходуется большое количество припоя.

При газопламенной пайке заготовки нагревают и припой расплавляют газосварочными, плазменными горелками и паяльными лампами. При пайке газосварочными горелками в качестве горючих газов используют ацетилен, природные газы, водород, пары керосина и т. п. При использовании газового пламени припой можно заранее помещать у места пайки или вводить в процессе пайки вручную. На место пайки предварительно наносят флюс в виде жидкой пасты, разведенной водой или спиртом; конец прутка припоя также покрывают флюсом.

Плазменной горелкой, обеспечивающей более высокую температуру нагрева, паяют тугоплавкие металлы — вольфрам, тантал, молибден, ниобий и т. п.

При пайке паяльниками основной металл нагревают и припой расплавляют за счет теплоты, аккумулированной в массе металла паяльника, который перед пайкой или в процессе ее подогревают. Для низкотемпературной пайки применяют паяльники с периодическим нагревом, с непрерывным нагревом и ультразвуковые. Рабочую часть паяльника выполняют из красной меди. Паяльник с периодическим нагревом в процессе работы периодически подогревают от постороннего источника теплоты. Паяльники с постоянным нагревом делают электрическими. Паяльники с периодическим и непрерывным нагревом чаще используют для флюсовой пайки черных и цветных металлов легкоплавкими припоями с температурой плавления ниже  $300\text{--}350^\circ\text{C}$ .

Ультразвуковые паяльники применяют для бесфлюсовой пайки на воздухе и для пайки алюминия. Окисные пленки разрушаются за счет колебаний ультразвуковой частоты.

На рис. 5.54 показаны основные типы соединений при пайке: внахлестку (а), встык (б), вкос (в), втавр (г), в угол (д), соприкасающиеся (е). Зазор между соединяемыми кромками должен быть ма-

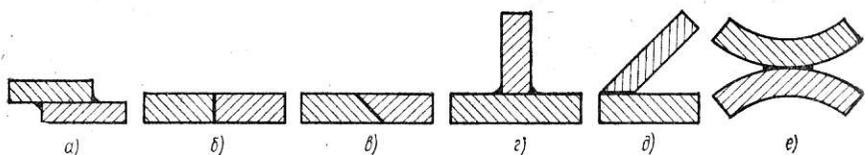


Рис. 5.54. Типы паяных соединений

лым для того, чтобы улучшить затекание припоя под действием капиллярных сил и увеличить прочность соединения. Так, например, для серебряных припоев устанавливают зазор до 0,05 мм, а для меди до 0,012 мм. Для хорошего смачивания поверхности необходимы механическая очистка, обезжиривание горячей щелочью, трихлорэтиленом, четыреххлористым углеродом.

## ГЛАВА VII. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

### 1. ДЕФЕКТЫ В СВАРНЫХ И ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

Дефекты в соединениях бывают двух типов: внешние и внутренние. В сварных соединениях к внешним дефектам относят наплывы, подрезы, наружные непровары и несплавления, поверхностные трещины и поры (рис. 5.55, а—г); к внутренним — скрытые трещины и поры, внутренние непровары и несплавления, шлаковые включения и др. (рис. 5.55, д—ж).

В паяных соединениях внешними дефектами являются наплывы и натеки припоя, неполное заполнение шва припоем; внутренними — поры, включения флюса, трещины и др.

Качество сварных и паяных соединений обеспечивают предварительным контролем материалов и заготовок, текущим контролем за процессом сварки и пайки и приемочным контролем готовых

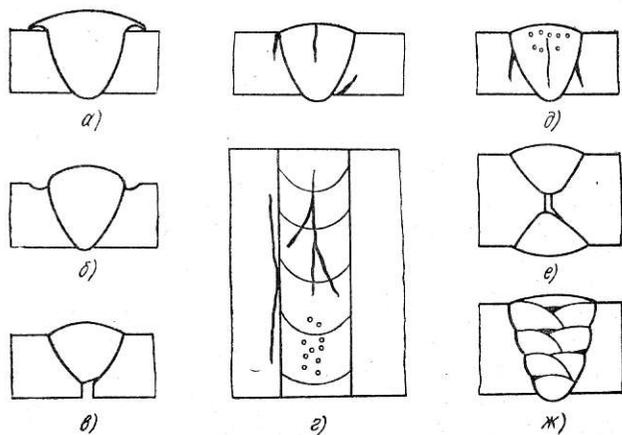


Рис. 5.55. Виды дефектов в сварных соединениях

сварных или паяных соединений. В зависимости от нарушения целостности сварного соединения при контроле различают *разрушающие* и *неразрушающие* методы контроля.

### 2. ВИДЫ КОНТРОЛЯ

При *предварительном* контроле основного и сварочных материалов устанавливают, удовлетворяют ли сертификатные данные в документах заводов-поставщиков требованиям, предъявляемым к материалам в соответствии с назначением и ответственностью сварных узлов и конструкций. Осматривают поверхности основного материала, сварочной проволоки и покрытий электродов в целях обнаружения внешних дефектов. Перед сборкой и сваркой заготовок проверяют, соответствуют ли их форма и габаритные размеры установленным, а также контролируют качество подготовки кромок и свариваемых поверхностей. При изготовлении ответственных конструкций сваривают контрольные образцы. Из них вырезают образцы для механических испытаний. По результатам испытаний оценивают качество основного и сварочных материалов, а также квалификацию сварщиков, допущенных к сварке данных конструкций.

При *текущем* контроле проверяют соблюдение сварщиками установленных параметров режима сварки и исправность работы сварочного оборудования. Осматривают сварные швы для выявления внешних дефектов и измеряют их геометрические размеры. Замеченные отклонения устраняют непосредственно в процессе изготовления конструкций.

Готовые сварные и паяные соединения в зависимости от назначения и ответственности конструкции подвергают *приемочному* контролю: внешнему осмотру для выявления поверхностных дефектов и обмеру сварных швов; испытаниям на плотность, магнитному контролю, просвечиванию рентгеновским и гамма-излучением, ультразвуком для выявления внутренних дефектов.

На плотность испытывают емкости для хранения жидкостей, сосуды и трубопроводы, работающие при избыточном давлении, путем гидравлического и пневматического нагружения, с помощью течеискателей и керосином.

При гидравлическом испытании емкости наполняют водой, а в сосудах и трубопроводах создают избыточное давление жидкости, превышающее в 1,5—2 раза рабочее давление. В таком состоянии изделие выдерживают в течение 5—10 мин. Швы осматривают в целях обнаружения течи, капель и отпотеваний.

При пневматическом испытании в сосуды нагнетают сжатый воздух под давлением, которое на 0,01—0,02 МПа превышает атмосферное. Соединение смачивают мыльным раствором или опускают в воду. Наличие неплотности в швах определяют по мыльным или воздушным пузырькам.

При испытании с помощью течеискателей внутри сосуда создают вакуум, а снаружи швы обдувают смесью воздуха с гелием. При наличии неплотностей гелий проникает в сосуд, откуда отсасывается

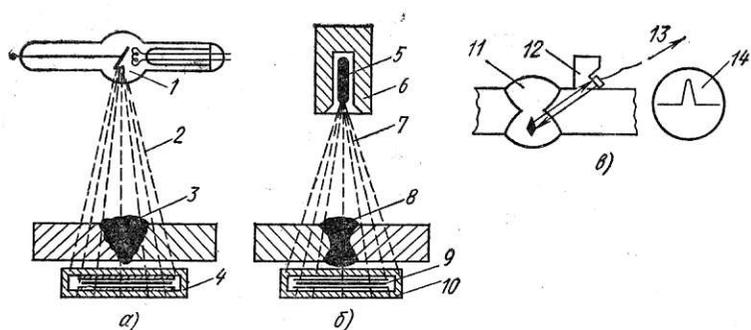


Рис. 5.56. Методы контроля сварных соединений:  
 а — рентгеновский; б — гамма-излучением; в — ультразвуковой

в теченскатель со специальной аппаратурой для его обнаружения.

При испытании керосином швы емкости с одной стороны смазывают керосином, а с другой — мелом. При наличии неплотности на поверхности шва, окрашенного мелом, появляются темные пятна керосина. Благодаря высокой проникающей способности керосина можно обнаружить поры диаметром в несколько микрометров.

Магнитный контроль основан на намагничивании сварных или паяных соединений и обнаружении полей магнитного рассеяния на дефектных участках. Изделие намагничивают, замыкая им магнитопровод электромагнита или помещая его внутрь соленоида. На поверхность соединения наносят порошок железной окалины или его масляную суспензию. Изделие слегка обстукивают для облегчения подвижности частиц порошка. По скоплению порошка обнаруживают дефекты, залегающие на глубине до 6 мм.

Рентгеновское просвечивание основано на различном поглощении рентгеновского излучения участками металла с дефектами и без них. Сварные соединения просвечивают с помощью специальных рентгеновских аппаратов. С одной стороны шва 3 на некотором расстоянии от него помещают рентгеновскую трубку 1, с другой (противоположной) стороны к нему плотно прижимают кассету 4 с рентгеновской пленкой (рис. 5.56, а). При просвечивании рентгеновские лучи 2 проходят через сварное соединение и облучают пленку. Для сокращения экспозиции просвечивания в кассету с пленкой закладывают усиливающие экраны. После проявления пленки на ней фиксируют участки повышенного потемнения, которые соответствуют дефектным местам в сварном соединении. Вид и размер дефектов определяют сравнением пленки с эталонными снимками.

Применяемые в промышленности рентгеновские аппараты позволяют просвечивать сварные соединения из стали толщиной 10—200 мм, алюминия до 300 мм, меди до 25 мм. При этом фиксируют дефекты, размеры которых составляют 2 % толщины металла.

При просвечивании сварных соединений гамма-лучами источником излучения служат радиоактивные изотопы кобальт-60, тулий-170, иридий-192 и др. Ампулу с радиоактивным изотопом 5 помещают

в свинцовый контейнер 6 (рис. 5.56, б). Техника просвечивания сварных соединений 8 гамма-лучами 7 подобна технике рентгеновского просвечивания. Этим способом выявляют аналогичные внутренние дефекты по потемнению участков пленки 9, помещенной в кассете 10. Просвечивание гамма-лучами по сравнению с рентгеновским имеет ряд преимуществ. Благодаря портативности аппаратуры его можно применять в любых условиях (в цехах, полевых условиях, на монтаже и т. п.). Кроме того, просвечивание гамма-лучами — менее дорогостоящий способ. Недостатком его является низкая чувствительность при просвечивании малых толщин (до 50 мм). На больших толщинах чувствительность такая же, как у рентгеновского метода.

Ультразвуковой контроль основан на способности ультразвуковых волн отражаться от поверхности раздела двух сред. С помощью пьезометрического щупа 12 ультразвукового дефектоскопа 13, помещаемого на поверхность сварного или паяного соединения, в металл 11 посылают ультразвуковые колебания (рис. 5.56, в). Ультразвук вводят в изделие отдельными импульсами под углом к поверхности металла. При встрече с поверхностью дефекта возникает отраженная ультразвуковая волна. В перерывах между импульсами щуп служит приемником отраженного от дефекта ультразвука. Дефект в соединении в виде пика 14 фиксируется на экране осциллографа.

Промышленные ультразвуковые дефектоскопы позволяют обнаруживать дефекты на глубине 1—250 мм. При этом можно выявлять дефекты с минимальной площадью (1—2 мм<sup>2</sup>). С помощью ультразвукового метода можно выявить наличие дефекта и даже место его расположения, но нельзя установить его вид.

## ГЛАВА VIII. ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

### 1. ПОНЯТИЕ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ

При проектировании сварных заготовок следует учитывать требования к технологичности их изготовления. Под технологичностью понимают выбор такого конструктивного оформления заготовок, которое обеспечивает удобство и простоту изготовления любыми видами сварки и при различных режимах; применение высокопроизводительных видов сварки: автоматизацию и механизацию максимального числа операций технологического процесса; низкую себестоимость процесса сварки за счет экономии сварочных материалов, повышения производительности и высокого уровня механизации; сведения к минимуму искажений формы, вызываемых тепловым и механическим воздействиями при сварке.

Технологичность обеспечивается выбором металла, формы свариваемых элементов и типа соединения, видов сварки и мероприятий по уменьшению сварочных деформаций и напряжений.

## 2. ВЫБОР МЕТАЛЛА

При выборе металла для сварочных заготовок необходимо учитывать не только его эксплуатационные свойства, но и его свариваемость или возможность применения технологических мероприятий, обеспечивающих хорошую свариваемость. В процессе сварки металл подвергается термическим, химическим и механическим воздействиям. В связи с этим в различных зонах основного металла, расположенного вблизи шва, изменяются его состав, структура и свойства. Следовательно, механические и эксплуатационные свойства металла в зоне сварного соединения могут быть неравноценны таким же свойствам основного металла.

Для получения сварных соединений, равноценных по работоспособности основному металлу, при конструировании сварных заготовок следует по возможности выбирать хорошо свариваемые металлы. К таким металлам относятся спокойные низкоуглеродистые стали и многие низколегированные стали, ряд сплавов цветных металлов, применение которых не ограничивается какими-либо требованиями к виду и режимам сварки.

При применении в связи с эксплуатационной необходимостью металлов с пониженной свариваемостью конструировать необходимо с учетом этого свойства. Для сведения к минимуму неблагоприятных изменений свойств металла сварного соединения и исключения в нем дефектов необходимо применять виды и режимы сварки, оказывающие минимальное термическое и другие воздействия на металл, и проводить технологические мероприятия (подогрев, искусственное охлаждение и др.), снижающие влияние на него сварочных воздействий. Термическая обработка после сварки (нормализация, закалка с отпуском и др.) может в значительной степени устранять неоднородность свойств в сварных заготовках. Прочность зоны сварного соединения может быть повышена механической обработкой после сварки: прокаткой, проковкой и др.

Проведение этих мероприятий во многом зависит от габаритных размеров и конструктивного оформления сварных заготовок. Для сложных заготовок с элементами больших толщин и размеров при наличии криволинейных швов в различных пространственных положениях можно применять только хорошо свариваемые металлы. Последние сваривают универсальными видами сварки, например ручной дуговой покрытыми электродами или полуавтоматической в защитных газах в широком диапазоне режимов. При сварке не нужны, например, подогрев, затрудненный вследствие больших толщин и размеров элементов, а также высокотемпературная термическая обработка, часто невозможная ввиду отсутствия печей и закалочных ванн соответствующего размера. Для простых малогабаритных узлов возможно применение металлов с пониженной свариваемостью, поскольку при их изготовлении используют самые оптимальные с точки зрения свариваемости виды сварки, например электронно-лучевую или диффузионную в вакууме. При этом легко осуществить все необходимые технологические мероприятия и требуемую термическую или механическую обработку после сварки.

## 3. ВЫБОР ТИПА СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

Тип сварного соединения определяют взаимным расположением свариваемых элементов и формой подготовки (разделки) их кромок под сварку (рис. 5.57). По первому признаку различают четыре основных типа сварных соединений: стыковые, тавровые, нахлесточные и угловые. Кромки разделяют в целях полного провара заготовок по сечению, что является одним из условий равнопрочности сварного соединения с основным металлом. Форму и размеры элементов разделки (угол, притупление и зазоры) назначают, исходя из условий проплавления, обеспечения формирования корня шва (без непроваров и прожогов) и минимального объема наплавленного металла.

Тип сварного соединения наряду с общими конструктивными соображениями выбирают с учетом обеспечения равнопрочности соединения с основным металлом и технологичности. Выбор разделки кромок зависит от толщины металла, его теплофизических свойств и вида сварки.

Стыковые соединения элементов плоских и пространственных заготовок наиболее распространены. Соединения имеют высокую прочность при статических и динамических нагрузках. Их выполняют практически всеми видами термической и многими видами термомеханической сварки. Некоторая сложность применения сварки с повышенной тепловой мощностью (автоматической под флюсом, плазменной струей) связана с формированием корня шва. В этом случае для устранения сквозного прожога при конструировании соединений необходимо предусматривать съемные и остающиеся подкладки. Другой путь — применение двусторонней сварки, однако при этом необходимы кантовка заготовки и свободный подход к корневой части сварного соединения. При сварке элементов различных толщин кромку более толстого элемента выполняют со скосом для уравнивания толщин, что обеспечивает одинаковый нагрев кромок и исключает прожоги в более тонком элементе. Кроме того, такая форма соединения работоспособнее вследствие равномерного распределения деформаций и напряжений.

Тавровые соединения широко применяют при изготовлении пространственных заготовок. Соединения с односторонней и двусторонней разделками кромок, выполненные с полным проваром, имеют высокую прочность при любых нагрузках. Тавровые соединения выполняют всеми видами термической сварки. Виды термомеханической сварки для тавровых соединений применяют редко (приварка стержня к пластине стальной контактной сваркой оплавлением и сваркой трением и т. п.).

Нахлесточные соединения часто применяют для сварки листовых заготовок при необходимости простой подготовки и сборки под сварку. Эти соединения, выполненные термической сваркой, менее прочны по сравнению со стыковыми соединениями. Они не экономичны вследствие перерасхода основного металла, обусловленного наличием перекрытия свариваемых элементов и наплавленного металла в связи с выполнением двух угловых швов. В то же время

Тип соединения	Ручная дуговая	Автоматическая под флюсом	Электронно-лучевая	Контактная стыковая	Контактная точечная	Контактная шовная
Стыковые						
Тавровые						
Нахлесточные						
Угловые						

Рис. 5.57. Типы сварных соединений, применяемых при основных способах сварки

нахлесточное соединение — основное соединение тонколистовых элементов при термомеханической сварке, особенно при точечной и шовной контактной сварке. В данном случае оно наиболее технологично, так как удобно для двустороннего и одностороннего подвода электродов перпендикулярно к поверхности металла. Точечные соединения часто играют роль связующих соединений и рабочих усилий не передают (точечные соединения сварных профилей при нагружении продольным усилием, соединения обшивок с каркасами и т. д.). Шовные соединения, как правило, несут рабочие нагрузки, но их прочность меньше, чем стыковых, выполненных термической сваркой. Это обусловлено дополнительным изгибом при осевом нагружении и концентрацией напряжений вследствие зазора между элементами.

Угловые соединения, как правило, выполняют в качестве связующих. Они не предназначены для передачи рабочих усилий. Их выполняют всеми видами термической сварки.

#### 4. ВЫБОР ФОРМЫ СВАРИВАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Сварные заготовки изготавливают из проката: листа, труб, профилей, а также из литых, кованных и штампованных элементов. При конструировании размеры и форму свариваемых элементов с точки зрения их технологичности следует выбирать, исходя из применения высокопроизводительных автоматических способов сварки; выполнения сварки в нижнем положении; свободного доступа к лицевой и корневой частям шва; проведения при необходимости подогрева (или охлаждения) и последующей термической или механической обработки; сведения к минимуму длины сварных швов и массы основного и наплавленного металлов и т. д.

Указанным рекомендациям соответствуют элементы простой геометрической формы: прямолинейные, цилиндрические, конические и полусферические с длинными прямыми и замкнутыми кольцевыми стыковыми и тавровыми соединениями. При выборе сортамента материалов для изготовления элементов предпочтительнее прокатные, гнутые или штамповочные профили и оболочки, тонкий лист и тонкостенные трубы и их сочетания.

#### 5. ВЫБОР ВИДА СВАРКИ

Вид сварки выбирают, исходя из размера и формы соединяемых заготовок; расположения швов в сварном соединении; физико-химических свойств, соединяемых материалов; возможности механизации и автоматизации процесса сварки. Так, например, для сварки листовых конструкций из всех марок сталей и некоторых цветных сплавов широко применяют дуговую и электрошлаковую сварку. Для получения стыковых соединений заготовок компактных, полых и развитых сечений из сталей и цветных металлов применяют контактную стыковую сварку. В производстве тонколистовых конструкций из сталей и цветных металлов для нахлесточных соединений

наиболее распространены точечная и шовная контактная сварка. В том случае, когда желательно ограничить температуру нагрева материала в зоне соединения, применяют холодную и ультразвуковую сварку.

### 6. ВЫБОР СПОСОБА УМЕНЬШЕНИЯ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ

При проектировании сварных заготовок необходимо предусматривать конструктивные и технологические мероприятия по устранению или уменьшению сварочных деформаций и напряжений. Внешние сварочные деформации приводят к снижению точности размеров заготовок и требуют назначения больших припусков на механическую обработку.

Сварочные деформации и напряжения возникают вследствие локальной пластической деформации отдельных зон сварного соединения из-за неравномерного разогрева при сварке. Металл в зоне максимального нагрева (шов и зона термического влияния), претерпевший пластическую деформацию сжатия при нагреве, после полного охлаждения получает остаточное укорочение. Это укорочение приводит к изменению формы и размеров всей сварной заготовки. Абсолютное укорочение ( $\Delta AB$  и  $\Delta CD$ ) линейных элементов ( $AB$  и  $CD$ ) пропорционально их длине в зоне пластической деформации ( $ABCD$ ) (рис. 5.58, а, б). В соответствии с этим основные закономерности процесса развития внешних сварочных деформаций сводятся к следующему: 1) абсолютное укорочение возрастает с увеличением зоны пластической деформации, т. е. с увеличением объема наплавленного металла и зоны разогрева заготовки; 2) при симметричном размещении наплавленного металла относительно центра тяжести сечения (ц. т.) свариваемых элементов изменяются только размеры последних, т. е. происходит деформация поперечной  $\Delta_n$  и продольной  $\Delta_{пр}$  усадок (рис. 5.58, в; 5.59, а); 3) при несимметричном расположении наплавленного металла относительно центра тяжести сечения также изменяется форма сварных заготовок, т. е. происхо-

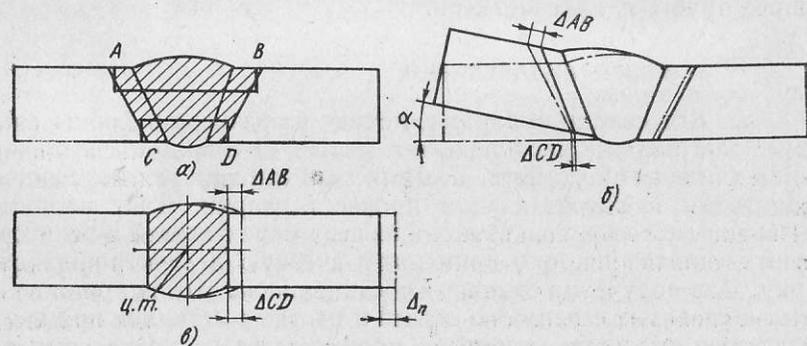


Рис. 5.58. Схема образования внешних сварочных деформаций

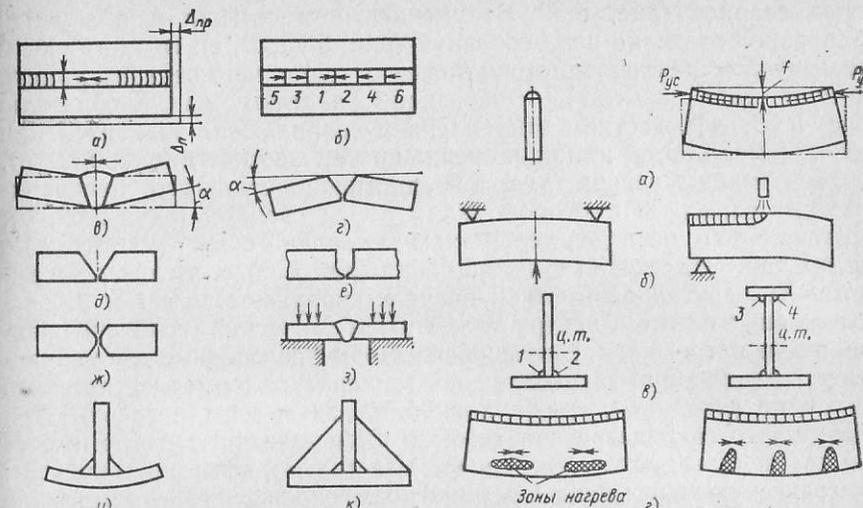


Рис. 5.59. Усадка и угловая деформация сварных заготовок и способы их устранения:

а, б — продольная и поперечная усадка; в-к — угловая деформация

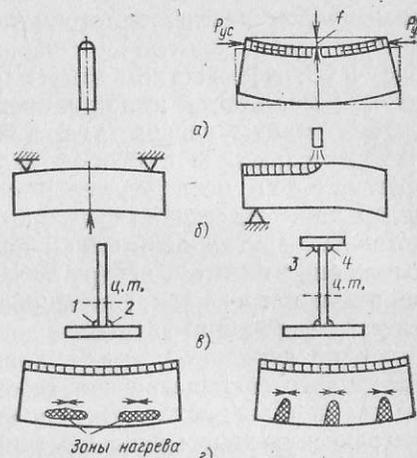


Рис. 5.60. Деформация изгиба сварных заготовок и способы ее устранения

дит деформация угловая  $\alpha$  и изгиба  $f$  (рис. 5.59, в; 5.60, а); 4) величина деформации определяется, с одной стороны, величиной остаточного укорочения, с другой — сопротивлением сварной заготовки деформации растяжения (сжатия), изгиба или кручения, т. е. соответствующей ее жесткостью.

Эффект укорочения металла в зоне пластических деформаций в ряде случаев может быть представлен как сжимающее действие некоторой фиктивной усадочной силы  $P_{yc}$ . Это позволяет рассчитывать сварочные деформации методами сопротивления материалов. Усадочную силу определяют количественно как произведение площади зоны пластической деформации в поперечном сечении соединения на предел текучести металла этой зоны.

Мероприятия, уменьшающие внешние сварочные деформации, направлены на снижение остаточного укорочения и устранение несимметричности его распределения, а также на повышение сопротивления свариваемых элементов деформированию. Они могут быть реализованы на этапе конструирования или изготовления сварного узла. Часто полностью устранить сварочные деформации не удастся. Поэтому при необходимости возможно применение правки уже готовых сварных заготовок.

Поперечную и продольную усадки сварных заготовок (рис. 5.59, а) можно скомпенсировать увеличением размеров заготовки под сварку на величину предполагаемой деформации; уменьшить сваркой обратно-ступенчатым способом (рис. 5.59, б; 1—6 — последовательность сварки). Угловая деформация (рис. 5.59, в, и) может быть устранена или снижена предварительным угловым изгибом заготовок

перед сваркой (рис. 5.59, а); уменьшением сечения шва заменой V-образной разделки на U-образную (рис. 5.59, д, е); симметричным размещением наплавленного металла относительно центра тяжести сечения шва заменой V-образной разделки на X-образную (рис. 5.59, ж); жестким закреплением свариваемых элементов при сварке (рис. 5.59, з) или применением ребер жесткости (рис. 5.59, к).

Деформацию изгиба (рис. 5.60, а) можно исключить предварительным обратным прогибом балки перед сваркой (рис. 5.60, б); рациональной последовательностью укладки швов относительно центра тяжести сечения сварной балки (рис. 5.60, в, в случае несимметричной двутавровой балки вначале сваривают швы 1 и 2, расположенные ближе к центру тяжести); термической (горячей) правкой путем нагрева зон, сокращение которых необходимо для исправления деформации заготовки, до температур термопластического состояния (рис. 5.60, г; штриховкой показаны зоны нагрева). При правке заготовки нагревают газовым пламенем или дугой с применением неплавящегося электрода. Разогретые зоны претерпевают пластическую деформацию сжатия, а после охлаждения — остаточное укорочение. Последнее обуславливает дополнительную деформацию сварной заготовки, противоположную по знаку первоначальной внешней сварочной деформации. Подобную деформацию можно также получить, если наложить в указанных зонах холодные сварные швы.

Остаточные сварочные напряжения представляют собой систему внутренних сил, находящихся в равновесии. При нарушении этого равновесия напряжения перераспределяются, что сопровождается упругими и пластическими деформациями в дополнение к сварочным деформациям, полученным ранее в процессе сварки. Поэтому при механической обработке сварных заготовок часто невозможно добиться высокой точности их размеров.

Для предупреждения возникновения высоких сварочных напряжений не следует допускать скопления сварных швов и пересечений их друг с другом, рекомендуется использовать способы сварки, обеспечивающие минимальный разогрев заготовок. Для снятия напряжений применяют высокий отпуск сварных заготовок, а также прокатку или проковку сварных швов. Другие способы уменьшения напряжений рассмотрены в разд. 5, гл. V, п. 1.

## РАЗДЕЛ 6

### ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ МАШИН РЕЗАНИЕМ

#### ГЛАВА 1. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

##### 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ДВИЖЕНИЙ В МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКАХ. СХЕМЫ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ

Одна из главных задач машиностроения — дальнейшее развитие, совершенствование и разработка новых технологических методов обработки заготовок деталей машин, применение новых конструкционных материалов и повышение качества обработки деталей. Особенно большое внимание уделяется чистовым и отделочным технологическим методам обработки, объем которых в общей трудоемкости обработки деталей постоянно возрастает. Наряду с механической обработкой резанием применяют методы обработки пластическим деформированием, с использованием химической, электрической, световой, лучевой и других видов энергий. Весьма прогрессивны комбинированные методы обработки (рис. 6.1).

Обработка металлов резанием — это процесс срезания режущим инструментом с поверхности заготовки слоя металла в виде стружки для получения необходимой геометрической формы, точности размеров, взаиморасположения и шероховатости поверхностей детали. Чтобы срезать с заготовки слой металла, необходимо режущему инструменту и заготовке сообщить относительные движения. Инструмент и заготовку устанавливают и закрепляют в рабочих органах станков, обеспечивающих эти относительные движения: в шпинделе, на столе, в револьверной головке. Движения рабочих органов станков подразделяют на движения резания, установочные и вспомогательные. Движения, которые обеспечивают срезание с заготовки слоя металла или вызывают изменение состояния обработанной поверхности заготовки, называют движениями резания. К ним относят главное движение и движение подачи.

За главное принимают движение, определяющее скорость деформирования и отделения стружки, за движение подачи — движение, обеспечивающее врезание режущей кромки инструмента в материал заготовки. Эти движения могут быть непрерывными или прерывистыми, а по своему характеру вращательными, поступательными, возвратно-поступательными. Скорость главного движения обозначают  $v$ , величину подачи —  $s$ .

Движения, обеспечивающие взаимное положение инструмента и заготовки для срезания с нее определенного слоя материала, называют установочными. К вспомогательным движениям относят транспортирование заготовки, закрепление заготовок и инструмента, быстрые перемещения рабочих органов станка и др.

## ГЛАВА I. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

*Сварка* — технологический процесс получения неразъемных соединений материалов посредством установления межатомных связей между свариваемыми частями при их местном или общем нагреве, или пластическом деформировании, или совместным действием того и другого. Сваркой соединяют однородные и разнородные металлы и их сплавы, металлы с некоторыми неметаллическими материалами (керамикой, графитом, стеклом и др.), а также пластмассы.

Сварка — экономически выгодный, высокопроизводительный и в значительной степени механизированный технологический процесс, широко применяемый практически во всех отраслях машиностроения.

Физическая сущность процесса сварки заключается в образовании прочных связей между атомами или молекулами на соединяемых поверхностях заготовок. Для образования соединений необходимо выполнение следующих условий: освобождение свариваемых поверхностей от загрязнений, оксидов и адсорбированных на них инородных атомов; энергетическая активация поверхностных атомов, облегчающая их взаимодействие друг с другом; сближение свариваемых поверхностей на расстояния, сопоставимые с межатомным расстоянием в свариваемых заготовках.

Указанные условия реализуются различными способами сварки путем энергетического воздействия на материал в зоне сварки. Энергия вводится в виде теплоты, упругопластической деформации, электронного, ионного, электромагнитного и других видов воздействия. В результате поверхностные атомы металлов и кристаллических неметаллических материалов образуют общие для соединяемых заготовок кристаллические решетки, а на поверхности пластмасс происходит объединение частей молекулярных цепей.

В зависимости от формы энергии, используемой для образования сварного соединения, все виды сварки разделяют на три класса: термический, термомеханический и механический.

К термическому классу относятся виды сварки, осуществляемые плавлением с использованием тепловой энергии (дуговая, плазменная, электрошлаковая, электронно-лучевая, лазерная, газовая и др.).

К термомеханическому классу относятся виды сварки, осуществляемые с использованием тепловой энергии и давления (контактная, диффузионная и др.).

К механическому классу относятся виды сварки, осуществляемые с использованием механической энергии и давления (ультразвуковая, взрывом, трением, холодной и др.).

*Свариваемость* — свойство металла или сочетания металлов образовывать при установленной технологии сварки соединение, отвечающее требованиям, обусловленным конструкцией и эксплуатацией изделия.

Свариваемость материалов оценивают степенью соответствия заданных свойств сварного соединения одноименным свойствам основного металла и их склонностью к образованию таких сварочных дефектов, как трещины, поры, шлаковые включения и др. По этим признакам материалы разделяют на хорошо, удовлетворительно и плохо сваривающиеся. Многие разнородные материалы, особенно металлы с неметаллами, не вступают во взаимодействие друг с другом. Такие материалы относятся к числу практически несваривающихся.

Свариваемость материалов в основном определяется типом и свойствами структуры, возникающей в сварном соединении при сварке. При сварке однородных металлов и сплавов в месте соединения, как правило, образуется структура, идентичная или близкая структуре соединяемых заготовок. Этому случаю соответствует хорошая свариваемость материалов. При сварке разнородных материалов в зависимости от различия их физико-химических свойств в месте соединения образуется твердый раствор с решеткой одного из материалов либо химическое или интерметаллидное соединение с решеткой, резко отличающейся от решеток исходных материалов. Механические и физические свойства твердых растворов, особенно химических или интерметаллидных соединений, могут значительно отличаться от свойств соединяемых материалов. Такие материалы относятся к удовлетворительно свариваемым. Если образуются хрупкие и твердые структурные составляющие в сварном соединении, то в условиях действия сварочных напряжений возможно возникновение трещин в шве или околошовной зоне. В последнем случае материалы относятся к категории плохо свариваемых.

## ГЛАВА II. ТЕРМИЧЕСКАЯ СВАРКА

### 1. ДУГОВАЯ СВАРКА. СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА

Источником теплоты при дуговой сварке служит электрическая дуга, которая горит между электродом и заготовкой. В зависимости от материала и числа электродов, а также способа включения электродов и заготовки в цепь электрического тока различают следующие способы дуговой сварки: сварка *неплавящимся* (графитным или вольфрамовым) *электродом* 1 дугой прямого действия 2