

СОВРЕМЕННОЕ СВАРОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Содержание:

1. Классификация способов сварки металлов.....	<u>1</u>
2. Электрическая дуга, ее свойства и характеристики.....	<u>5</u>
3. Общие требования к сварочному оборудованию.....	<u>9</u>
4. Сварка ММА.....	<u>13</u>
5. Сварка MIG/MAG.....	<u>18</u>
6. Сварка TIG.....	<u>24</u>
7. Плазменная дуговая сварка.....	<u>28</u>
8. Лазерная сварка.....	<u>30</u>
9. Контактная сварка.....	<u>37</u>

1. Классификация способов сварки металлов.

В зависимости от вида энергии, применяемой при сварке металлов, различают три класса сварки: *термический, термомеханический и механический*. Вид источника энергии, непосредственно применяемого для образования сварного соединения, определяет *вид* сварки (см. [рис. 1.1](#)).

К *термическому классу* относятся виды сварки, осуществляемые путем местного расплавления кромок соединяемых деталей с использованием тепловой энергии. Виды сварки, относящиеся к термическому классу: *дуговая, электрошлаковая, электронно-лучевая, плазменная, лазерная, газовая* и др.

Основным видом *термического класса* является *дуговая сварка* – сварка плавлением, при которой для нагрева кромок соединяемых деталей используется теплота электрической дуги.

Лазерная сварка – сварка плавлением, при которой нагрев металла осуществляется когерентным световым лучом, создаваемым оптическим квантовым генератором (лазером).

При *электронно-лучевой сварке* для нагрева соединяемых частей металла используют энергию электронного луча. Теплота выделяется за счет бомбардировки зоны сварки направленным электронным потоком.

Электрошлаковая сварка – сварка плавлением, при которой для нагрева металла используют теплоту, выделяющуюся при прохождении электрического тока через расплавленный электропроводный шлак.

Индукционная сварка – сварка индукционным нагревом электромагнитным полем высокой частоты.

Плазменная сварка – особый вид дуговой сварки, основанный на использовании для нагрева металла направленного потока плазмы, совпадающего с токоведущим столбом создающей его дуги прямого действия.

Термитная и газовая – химические виды сварки, при которых электрическая энергия не используется.

С конца прошлого века в научно-технической литературе появляется все больше публикаций о применении *комбинированных* процессов сварки. К такому виду сварки в частности относятся *лазерно-дуговая* и *лазерно-плазменная*, основанные на совместном использовании лазерного излучения и электрической, в том числе плазменной, дуги.

К *термомеханическому классу* относятся виды сварки, при которых используются тепловая энергия и давление: *контактная, диффузионная и прессовая*.

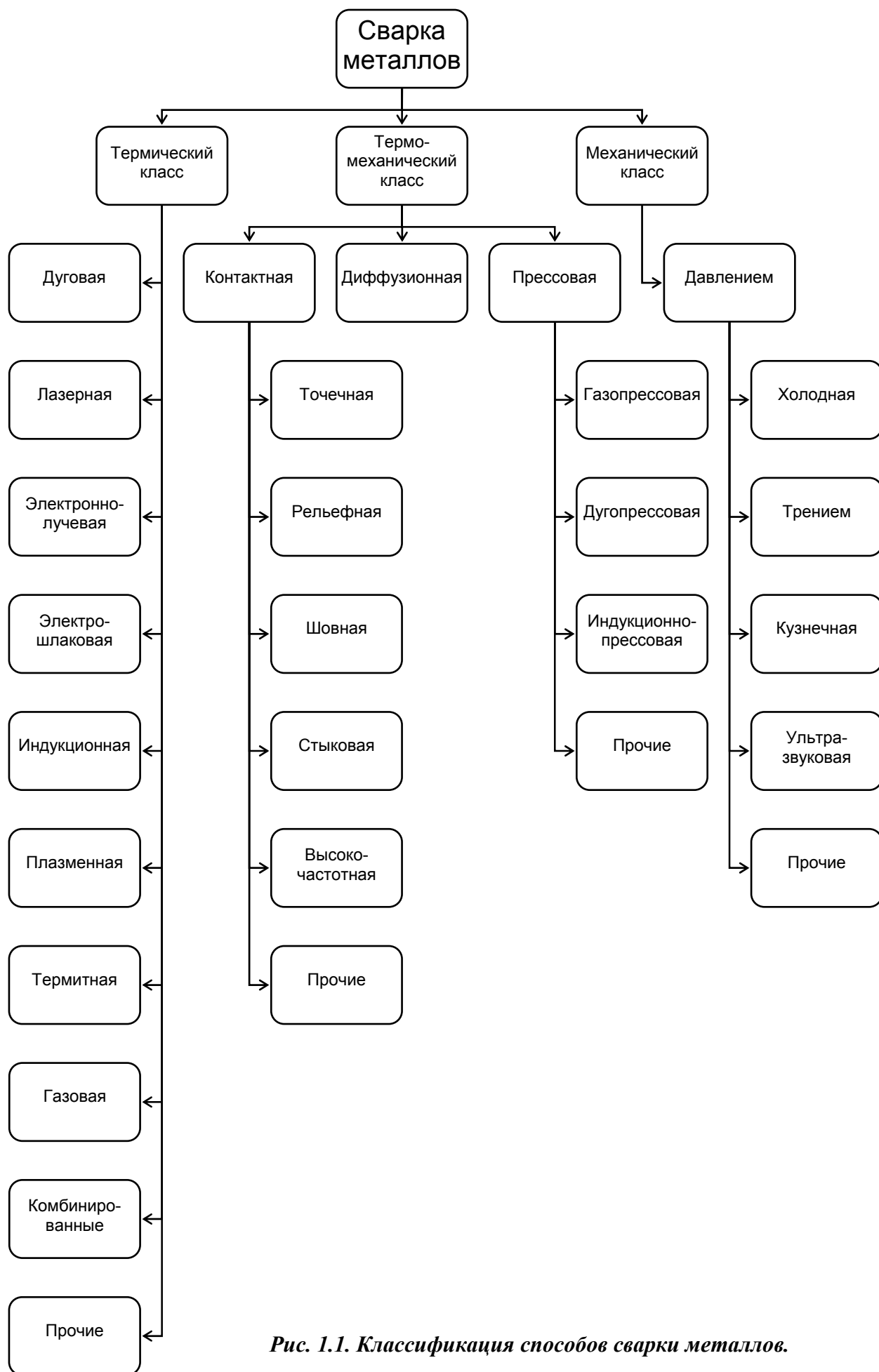


Рис. 1.1. Классификация способов сварки металлов.

Основным видом *термомеханического класса* является *контактная сварка* – сварка с применением давления, при которой нагрев осуществляется теплотой, выделяемой при прохождении электрического тока через находящиеся в контакте соединяемые части металла.

Основными видами контактной сварки являются *точечная, шовная и стыковая*. *Рельефная* сварка является разновидностью точечной сварки.

Высокочастотная контактная сварка – метод сварки металлов, использующий для нагрева свариваемых поверхностей токи высокой частоты.

Диффузионная сварка – сварка давлением, осуществляемая взаимной диффузией атомов контактирующих частей при относительно длительном воздействии повышенной температуры и при незначительной пластической деформации.

При *прессовых видах* сварки соединяемые детали в месте сварки нагреваются пламенем газов, сжигаемых на выходе из сварочной горелки (*газопрессовая*), теплом электрической дуги (*дугопрессовая*), индукционным нагревом (*индукционнопрессовая*) и др.

К *механическому классу* относятся виды сварки, осуществляемые с использованием механической энергии и давления: *холодная, ультразвуковая, трением* и др.

Холодная сварка – сварка давлением при значительной пластической деформации без внешнего нагрева соединяемых частей металла.

Ультразвуковая сварка – сварка давлением, осуществляемая в микрообъемах металла, в которых силы трения возникают под действием на детали, сжатые осевой силой, ультразвуковых колебаний. Ультразвуковая сварка применяется в частности в электронной промышленности для приварки траверсов кристаллов радиоэлементов.

В современных сварочных технологиях наибольшее распространение получила дуговая сварка. На [рис. 1.2](#) представлена классификация способов дуговой сварки.

Различают электродуговую сварку *плавящимся* или *неплавящимся электродами*.

В настоящее время широко используется ручная дуговая сварка – сварка *плавящимися штучными покрытыми электродами*. Покрытие электрода – смесь веществ для обеспечения ионизации дугового промежутка, защиты от вредного воздействия воздуха и металлургической обработки сварочной ванны.

Сварка *проволокой* относится к механизированным сварочным процессам. Для защиты сварочной ванны здесь используют *защитные газы, флюсы, самозащитную газофлюсовую проволоку*. В качестве защитных газов используются *инертные* (Ar, He) и *активные* (CO₂, N₂, H₂, O₂) газы, а также их смеси.

Чаще всего в качестве материала для *неплавящихся электродов* используется вольфрам, а в качестве *защитного газа* – аргон.

Плазменная сварка является развитием сварки вольфрамовым электродом в среде ар-

гона и отличается от нее более высокой концентрацией энергии в дуге за счет ее сжатия в плазмотроне плазмообразующим газом.

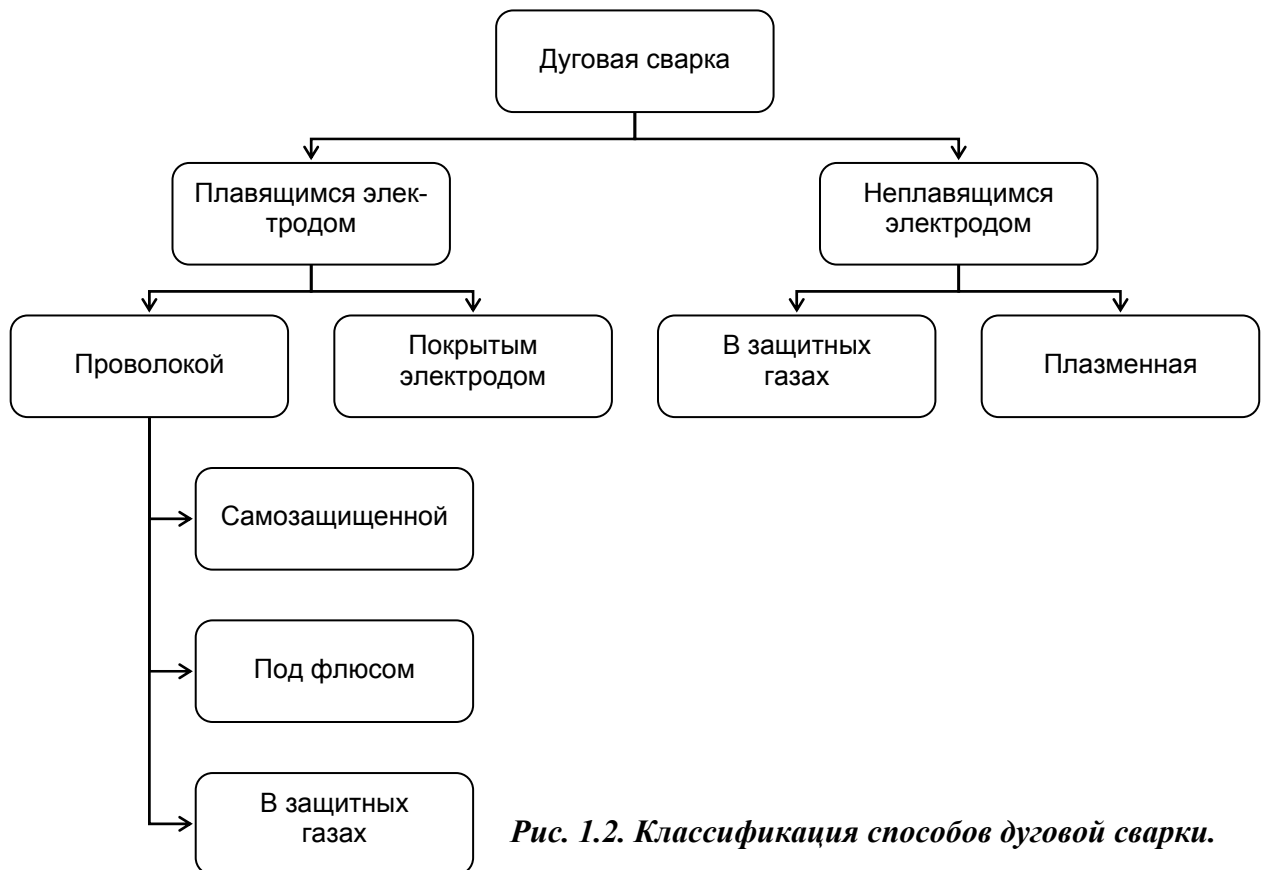


Рис. 1.2. Классификация способов дуговой сварки.

Также в качестве признака классификации дуговой сварки может служить *стационарный* или *нестационарный (импульсный)* характер дуги. Управляемая по оптимальным алгоритмам импульсно-дуговая сварка позволяет получать принципиально лучшее качество сварных соединений в сравнении со стационарным процессом.

Сварочные процессы широко применяют и для *наплавки*. *Наплавка* – процесс нанесения с помощью сварки слоя на поверхность изделия. Наплавку применяют для восстановления изношенных деталей и для получения изделий с заданными свойствами поверхности. Для наплавки используют, как правило, дуговые виды сварки.

Электрическую дугу применяют также для других, близких к сварочным, технологий обработки металлов, в частности, для *резки* и *строжки* (обработки деталей и удаления дефектов). Для воздушно-дуговой (плазменной) резки и строжки используется специальная горелка (плазмотрон), которая направляет мощную струю сжатого воздуха в сварочную ванну, выдувая расплавленный металл.

2. Электрическая дуга, ее свойства и характеристики.

Электрические процессы в дуге.

Электрическая дуга (рис. 2.1) представляет собой мощный установившийся электрический разряд между двумя электродами в ионизированной газовой среде. Электропроводность межэлектродного промежутка обусловлена наличием электрически заряженных частиц – электронов и ионов. Под действием напряжения источника электроны перемещаются к аноду, а положительно заряженные ионы – к катоду.

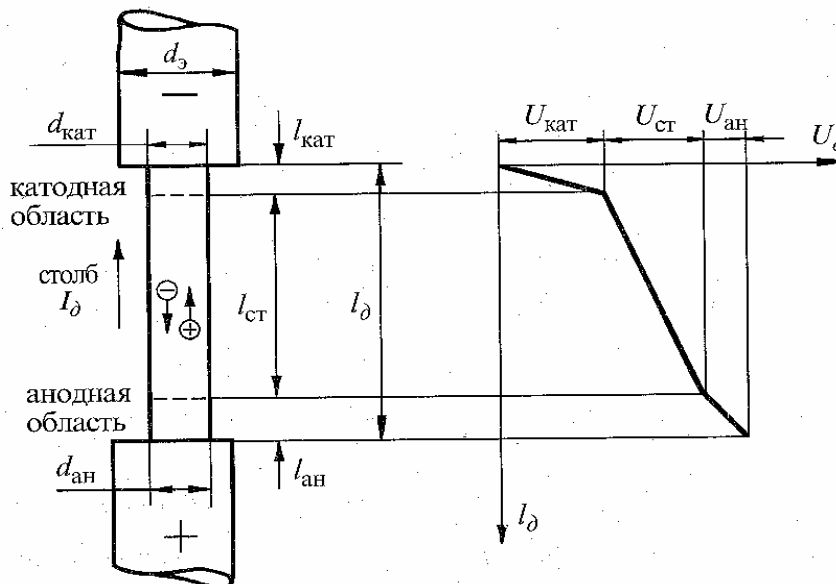


Рис. 2.1. Модель сварочной дуги и распределение потенциала по ее длине.

Электрическая дуга, используемая для сварки металлов, называется *сварочной дугой*. Дуга, горящая между электродом и изделием, является дугой прямого действия.

Электрические свойства дуги определяются процессами, протекающими в трех характерных зонах – *катодной области, столбе и анодной области* дуги.

Столб дуги. Заряженные частицы в столбе появляются из анодной и катодной областей, а также возникают в нем за счет термической ионизации нейтральных частиц. Сварочным током $I_д$ считают ток проводимости, обусловленный упорядоченным движением свободных электронов и ионов. При этом электронная составляющая тока в сотни раз больше ионной. Длина столба сварочной дуги $l_{ст}$ составляет 0,1...4 см, падение напряжения в столбе $U_{ст}$ достигает 40 В, а напряженность поля в нем:

$$E_{ст} = U_{ст}/l_{ст} = 10...40 \text{ В/см.}$$

Катодная область. Катод эмитирует электроны как за счет нагрева его поверхности (термоэлектронная эмиссия), так и за счет создания у его поверхности электрического поля высокой напряженности (автоэлектронная эмиссия). Кроме того, электроны и ионы образуются в самой катодной зоне благодаря термической ионизации нейтрального газа. У поверхности катода создается объемный положительный заряд, вызванный высокой концентрацией положительно заряженных ионов.

Анодная область. У поверхности анода наблюдается объемный отрицательный заряд.

Распределение потенциала в дуге имеет вид, показанный на [рис. 2.1](#). Напряжение дуги складывается из падения в трех ее основных областях:

$$U_d = U_{\text{кат}} + U_{\text{ан}} + U_{\text{ст.}}$$

Общее напряжение сварочной дуги находится в пределах 20...40 В.

Статическая вольтамперная характеристика дуги.

Статическая вольтамперная характеристика (СВАХ) представляет собой зависимость напряжения дуги от ее тока $U_d = f(I_d)$ ([рис. 2.2](#)).



Рис. 2.2. Статическая вольтамперная характеристика дуги.

Ее строят по экспериментальным данным при плавном изменении тока и сохранении неизменными физических условий горения дуги. В частности, должны оставаться постоянными диаметр электрода d_e , длина дуги l_d , материал электрода, и состав газа. Дуга имеет криволинейную статическую характеристику и, следовательно, является нелинейным элементом электрической цепи. На СВАХ выделяют три участка: падающий (I), жесткий (II) и возрастающий (III).

Напряжение столба дуги зависит от его сопротивления и силы тока:

$$U_{\text{ст}} = I_d \cdot R_{\text{ст.}}$$

В маломощных дугах (участок I) с ростом тока I_d резко увеличивается площадь сечения столба $S_{\text{ст}}$, что приводит к снижению плотности тока J_d и к уменьшению $U_{\text{ст}}$ и общего напряжения дуги U_d . Такая падающая характеристика наблюдается при сварке неплавящимся электродом и ручной сварке покрытым электродом.

При дальнейшем росте тока пропорционально увеличивается и площадь столба, плотность тока остается приблизительно постоянной, поэтому и напряжение дуги не меняется с ростом тока. Характеристика на участке II жесткая, она наблюдается при сварке покрытым электродом и сварке под флюсом.

Возрастающий участок III наблюдается при таком токе, когда дуга уже заняла весь торец стержневого электрода ($d_{\text{кат}} \approx d_e$), и дальнейшее увеличение площади $S_{\text{ст}}$ затруднено. Поэтому с ростом тока пропорционально увеличивается его плотность и напряжение на дуге. Возрастающая характеристика наблюдается при механизированной сварке под флю-

сом и при сварке в защитных газах тонкой электродной проволокой. Граница между I и II участками при различных способах и условиях дуговой сварки приходится приблизительно на 100 А.

Начальное зажигание дуги.

Под начальным зажиганием дуги понимают процесс возбуждения дуги в начале сварки. От него нужно отличать повторное зажигание после случайных обрывов дуги, которое выполняется теми же способами, что и начальное, но происходит в более благоприятных условиях при уже разогретых электродах. Непосредственным критерием при оценке надежности начального зажигания принято считать процент успешных попыток или количество попыток до первой успешной.

Практическое применение при дуговой сварке нашли два способа начального зажигания:

- высоковольтным искровым разрядом,
- разрывом цепи короткого замыкания электрода на изделие.

Зажигание дуги высоковольтным разрядом иллюстрирует рис. 2.3. При этом последовательно с основным источником или параллельно с ним подключается вспомогательный высоковольтный источник малой мощности – осциллятор. **По соображениям безопасности он выполняется импульсным или высокочастотным (частота $f > 100$ кГц).** Назначение высоковольтного источника – пробить искрой, т.е. ионизировать межэлектродный промежуток, по которому затем пойдет ток от основного источника.

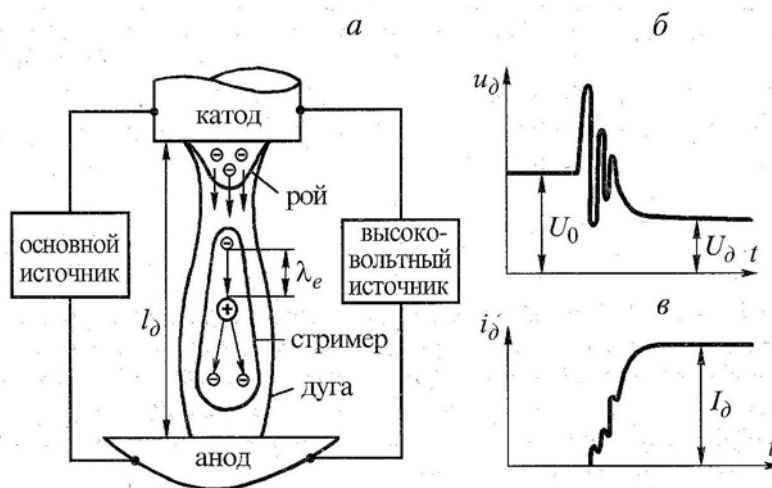


Рис. 2.3. Схема процесса (а) и осциллограммы напряжения (б) и тока (в) при зажигании дуги высоковольтным разрядом.

Механизм высоковольтного пробоя газового промежутка можно представить следующим образом. Высоковольтный источник создает между электродами сильное электрическое поле напряжением в несколько тысяч вольт. В результате образуется плазменный канал – стример, состоящий из заряженных частиц. Происходит пробой газо-

вого промежутка, между электродами образуется ионизированный плазменный мостик, по которому начинает протекать ток от основного источника, под действием которого происходит разогрев электродов и развитие термоэлектронной эмиссии с катода.

Для повышения надежности зажигания следует увеличивать напряжение высоковольтного источника $U_{\text{вн}}$ или снижать длину дуги $l_{\text{д}}$. Напряженность поля, достаточная для пробоя воздуха между электродами при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении, составляет около 10 кВ/см. При распространенных длинах дуги 2...5 мм **напряжение высоковольтного высокочастотного источника – осциллятора – должно составлять 2000...5000 В.**

На второй стадии зажигания необходимо обеспечить развитие самостоятельного дугового разряда с питанием от основного источника (см. [рис. 2.3,б и в](#)). Для этого напряжение источника $U_{\text{и}}$ должно быть не ниже напряжения дуги $U_{\text{д}}$.

Напряжение $U_{\text{д}}$ зависит от длины дуги. Напряжение холостого хода U_0 в 2...4 раза выше среднего напряжения дуги $U_{\text{д}}$ и составляет для источников общепромышленного применения 60...110 В. Считается, что самостоятельный дуговой разряд существует при мощности не менее 200...300 Вт на 1 см длины дуги, поэтому **основной источник при различных условиях сварки должен обеспечивать ток $I_{\text{д}}$ не менее 3...10 А.**

Оценим условия надежного зажигания. На первой стадии необходимо обеспечить энергичный разрыв цепи короткого замыкания. При недостаточной плотности тока в электроде (менее 20 А/мм) жидкие перемычки между электродом и изделием не взрываются, а, наоборот, застывают. "Примерзание" электрода можно предотвратить его резким отдергиванием или увеличением тока. **Превышение тока короткого замыкания $I_{\text{к}}$ над сварочным в 1,2...5 раз способствует надежному зажиганию дуги.**

На второй стадии важно, чтобы напряжение источника было достаточным для питания дуги ($U_{\text{и}} \geq U_{\text{д}}$). Длину дуги $l_{\text{д}}$ с этой же целью снижают. Действительно, при чрезмерном отдергивании возникшая дуга может оборваться. Кроме того, полезно в цепь источника вводить индуктивность. Запасенная в ней на стадии короткого замыкания энергия отдается дуге, стремясь поддержать ток на высоком уровне без провала.

3. Общие требования к сварочному оборудованию.

В технологическом процессе дуговой сварки источник, воздействуя на дугу, выполняет следующие основные функции:

- обеспечивает зажигание;
- поддерживает устойчивое горение дуги;
- используется для настройки (регулирования) режима.

Кроме того, источник, опосредованно – через дугу – воздействуя на шов, выполняет дополнительные функции:

- способствует благоприятному характеру переноса электродного металла;
- способствует качественному формированию шва.

Кроме него на качество сварки влияют квалификация сварщика, свойства сварочных материалов, а также внешние условия сварки.

Назовем сварочные свойства в порядке перечисления соответствующих им функций источника.

Надежность зажигания дуги является важным свойством источника, поскольку влияет на качество начального участка шва, а при сварке короткими швами – и на производительность.

Устойчивость и стабильность процесса сварки оказывает непосредственное влияние на качество шва, постоянство его ширины и глубины проплавления.

Эффективность регулирования (настройки) параметров режима характеризует источник потому, что его регулятором настраиваются обычно сила тока или напряжение дуги, оказывающие влияние на производительность и качество сварки.

Характер переноса электродного металла в той степени, в которой он зависит от источника, определяется параметрами режима, но особенно связан с величиной и скоростью изменения тока при технологических коротких замыканиях каплями электродного металла с поверхностью сварочной ванны.

Качество формирования шва от источника зависит косвенно и особенно связано с устойчивостью и стабильностью процесса сварки. Если процесс неустойчив, то в результате частых обрывов дуги получается неровный шов. В случае устойчивого, но нестабильного (по величине тока и напряжения) процесса также наблюдается непостоянство размеров шва, хотя и в меньшей степени, чем при неустойчивом процессе.

Для обеспечения приемлемых сварочных свойств источники питания для дуговой сварки должны удовлетворять следующим требованиям:

1) иметь напряжение холостого хода U_0 , т. е. напряжение на зажимах источника при разомкнутой сварочной цепи, достаточное для легкого возбуждения дуги и устойчивого ее горения, но не превышающее норм безопасности работы, т. е. не более 100 В;

- 2) обладать достаточной мощностью для выполнения сварочных работ;
- 3) обеспечивать требуемый ток короткого замыкания $I_{кз}$, но не превышающий установленных значений, чтобы источник выдерживал продолжительные короткие замыкания сварочной цепи при достаточной стабильности процесса $I_{кз} = (1,2 \dots 1,5)I_{св}$;
- 4) обладать требуемыми динамическими свойствами, т. е. обеспечивать заданную скорость нарастания тока короткого замыкания и быстрое восстановление напряжения дуги после коротких замыканий;
- 5) иметь устройства для плавного регулирования силы сварочного тока (напряжения);
- 6) обладать требуемой внешней характеристикой;
- 7) обладать высокой надежностью.

Основными параметрами источников питания сварочной дуги являются следующие.

Номинальный ток I_n — главный параметр, на который рассчитывается источник, выбирают из рекомендованного ряда номинальных токов: 50, 80, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, ... А.

Номинальное напряжение U_n , например, при ручной дуговой сварке вычисляется по соотношению $U_n = 20 + 0,04I_n$.

Пределы регулирования тока включают минимальное $I_{\min}$ и максимальное $I_{\max}$ значения тока, получаемые при крайних положениях регулировочных устройств и условной рабочей нагрузке.

Пределы регулирования напряжения указываются у источников, предназначенных для механизированной сварки в углекислом газе.

Напряжение холостого хода U_0 .

Напряжение U_c , частота f_c и количество фаз первичной сети.

Коэффициент электрической нагрузки (ПН, ПВ) — максимально допустимое отношение времени сварки к общему времени продолжительной работы с периодом 5 либо 10 минут при максимальной рабочей температуре. Для источников ручной сварки коэффициент нагрузки *определяется относительной продолжительностью нагрузки ПН*, его номинальное значение для максимального значения тока $I_{\max}$ обычно составляет до 60 % при времени цикла 5 мин. *Относительная продолжительность включения ПВ* указывается для источников механизированной сварки, работающих в повторно-кратковременном режиме, и обычно составляет 60 % при времени цикла 10 мин.

Коэффициент полезного действия η приводится для номинального режима.

Коэффициент мощности K_M — отношение активной потребляемой мощности к габаритной (полной) мощности. Иногда в качестве коэффициента мощности указывается $\cos\varphi$

– косинус сдвига фазы между напряжением питания и потребляемым током, что правильно только при синусоидальной форме напряжения и тока.

Диапазон рабочих температур окружающей среды ΔT .

Класс защиты по системе IP.

Масса приводится в кг.

Габаритные размеры обычно указываются в порядке: длина × ширина × высота в мм.

В 80-е годы двадцатого столетия благодаря развитию силовых электронных компонентов транзисторная инверторная технология преобразования электрической энергии начала применяться для построения источников питания сварочной дуги. Благодаря наличию инвертора – звена преобразования постоянного напряжения в высокочастотное импульсное – удастся снизить массу и габариты источников в десятки раз. Кроме того, [инвертор](#) по сравнению с низкочастотным трансформатором способен обеспечить управляемость всеми характеристиками, свойствами и параметрами источника для удовлетворения существующих и перспективных требований.

Надежность сварочного оборудования обеспечивается совокупностью многих факторов:

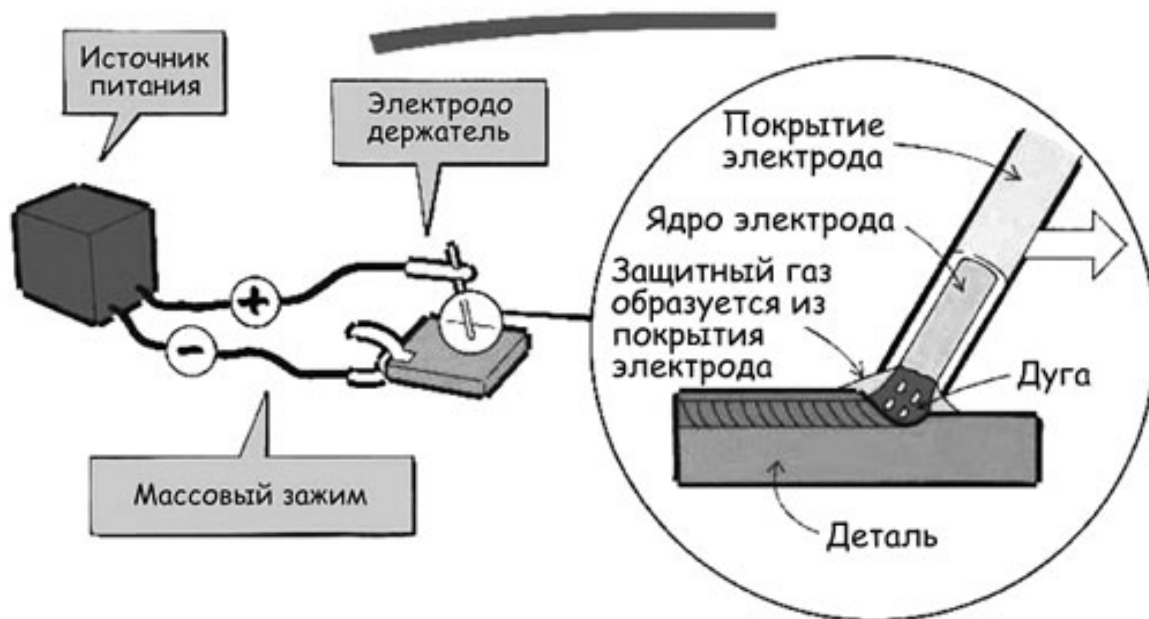
- эффективным отводом тепла для обеспечения заданного коэффициента нагрузки,
- наличием защиты от перегрева при его превышении,
- наличием защиты от отклонений более допустимых значений напряжения питающей сети,
- наличием защиты от короткого замыкания в нагрузке,
- наличием аварийной защиты силовых ключей от перегрузки по току и коммутационных перенапряжений,
- стабильным качеством применяемых электронных компонентов,
- стабильным качеством сборки и монтажа,
- достижением стабильно низкого теплового сопротивления корпус – радиатор при монтаже силовых сборок,
- наличием защиты от попадания посторонних предметов, грязи и пыли,
- соответствием прочности конструкции, диапазона рабочих температур и питающих напряжений условиям эксплуатации...

В инверторных источниках значительная часть тепла выделяется силовыми полупроводниковыми приборами, трансформаторами и дросселями, управляющей электронике принудительное охлаждение не требуется. Лишнее тепло выводится с помощью вентилятора. Сварочная работа часто производится в пыльных, грязных и влажных условиях, в которых оборудование подвергается тяжелым механическим нагрузкам. Для таких усло-

вий возможно сохранить низкую температуру узлов путем направления охлаждающего воздуха через те узлы, которым охлаждение необходимо, не пропуская воздуха к электронным платам. Это, а также наличие функции *"вентилятор по необходимости"*, когда он работает только при нагреве узлов, гарантирует минимум грязи внутри источника и простоев по сервису.

Постоянно возрастает потребность в *высококачественных пользовательских интерфейсах* сварочного оборудования, позволяющих адаптировать источник требованиям сварочных работ, когда функции источника выбираются и регулируются с помощью *цифровой* технологии. Панели управления имеют удобные в применении дисплеи, регуляторы, переключатели. Во многих ответственных применениях необходимо иметь функцию запоминания и отражения на дисплее последнего фактического режима сварки, регистрацию и документацию всего сварочного процесса с выводом твердой копии. Может быть предусмотрена возможность записи в память и вызова из памяти употребляемых режимов сварки как основных характеристик источника.

4. Сварка ММА.



ММА (Manual Metal Arc) – [ручная дуговая сварка](#) (в российской литературе – РДС) покрытыми штучными электродами.

Сущность способа.

К электроду и свариваемому изделию для образования и поддержания сварочной дуги от источника сварочного тока подводится постоянный или переменный сварочный ток ([рис. 4.1](#)). Дуга расплавляет металлический стержень электрода, его покрытие и основной металл. Расплавляющийся металлический стержень электрода в виде отдельных капель, покрытых шлаком, переходит в сварочную ванну. В сварочной ванне электродный металл смешивается с расплавленным металлом изделия, а расплавленный шлак всплывает на поверхность.

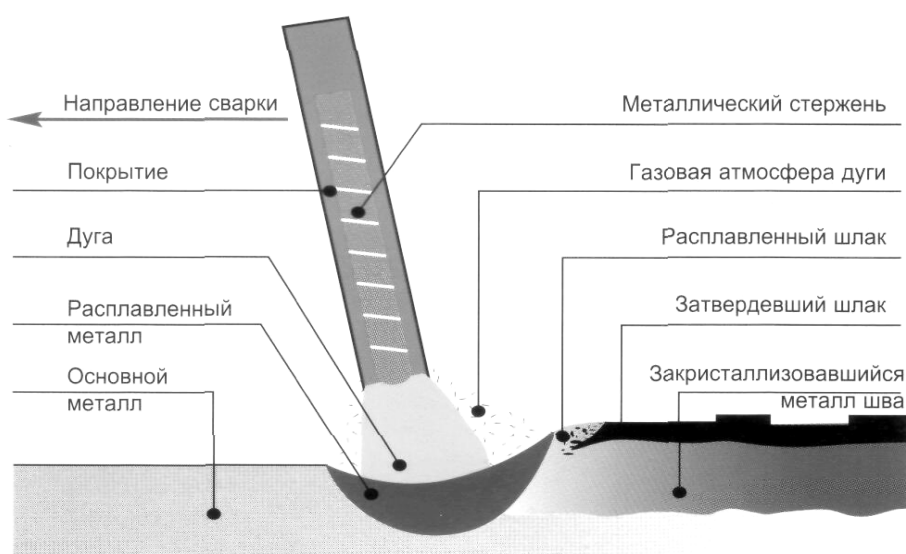


Рис. 4.1. Ручная дуговая сварка металлическим электродом с покрытием.

Расстояние от активного пятна на расплавленной поверхности электрода до другого активного пятна дуги на поверхности сварочной ванны называется длиной дуги. В усло-

виях высоких температур металлы проявляют высокую активность по отношению к кислороду и азоту, находящимся в воздухе. Поэтому в состав покрытия электрода входят газообразующие и шлакообразующие элементы, которые, расплавляясь, защищают расплавленный металл от воздуха. Расплавляющееся покрытие электрода образует вокруг дуги и над поверхностью сварочной ванны газовую атмосферу, которая, оттесняя воздух из зоны сварки, препятствует взаимодействию его с расплавленным металлом. В газовой атмосфере присутствуют также пары основного и электродного металлов и легирующих элементов. Шлак, покрывая капли электродного металла и поверхность расплавленного металла сварочной ванны, способствует предохранению их от контакта с воздухом и участвует в металлургических взаимодействиях с расплавленным металлом.

Ручная дуговая сварка штучными электродами до сих пор остается наиболее распространенным и универсальным методом электрической сварки плавлением, а зачастую – единственно возможным. Ток сварки в зависимости от толщины свариваемых деталей и диаметра применяемых электродов составляет от 20 до 500 А.

Требования к оборудованию.

Внешняя статическая вольтамперная характеристика (ВАХ) источника для сварки ММА – крутопадающая с дифференциальным сопротивлением от $-0,3$ до -3 В/А.

Источник для сварки ММА должен обеспечивать сварку всеми типами электродов, что достигается достаточным значением напряжения холостого хода (до 80...100 В), оптимальным наклоном рабочего участка ВАХ, возможностью форсирования тока дуги, родом сварочного тока (постоянный, знакопостоянный пульсирующий), полярностью сварочного тока.

ПН на максимальном токе для оборудования различных производителей составляет от 15...60 до 100%, на среднем и минимальном – до 100 %. Превышение ПН может приводить к перегреву термонапряженных элементов и их отказу.

Для достижения максимальной производительности, качества и всего спектра функциональных возможностей при сварке штучными электродами, в источниках могут быть предусмотрены следующие *рабочие, сервисные и защитные функции и режимы*, отвечающие современным требованиям к сварочным свойствам и эксплуатационным качествам.

1. "Горячий старт" ("Hot start"). Эта функция предназначена для облегчения зажигания дуги за счёт кратковременного (0,01..1 сек.) увеличения стартового тока по отношению к базовому на регулируемую оператором величину ([рис. 4.2,а](#)). По истечении установленного времени горение дуги стабилизируется и ток "горячего старта" плавно опустится до базового сварочного тока. Данная функция обеспечивает быстрое и уверен-

ное зажигание дуги, предотвращает прилипание электрода к детали и помогает избежать сварочных дефектов.

2. **"Форсаж дуги" ("Arc force").** Для того чтобы предотвратить прилипание электрода к детали во время сварки, применяется функция форсирования дуги. Принцип действия функции основан на временном повышении тока в момент перемирания капель расплавленного металла дугового промежутка (короткого замыкания) ([рис. 4.2,б](#)). Импульс тока помогает капле оторваться от стержня электрода, делая тем самым процесс переноса капель через дуговой промежуток четким и равномерным. Эта функция обеспечивает стабильное горение дуги, позволяет варить в удобном положении, облегчает работу сварщика. Если обеспечить регулировку тока форсирования дуги, сварочные свойства источника можно изменять в зависимости от типа применяемого электрода (с рутиловым, основным или целлюлозным покрытием). Для получения мягкой дуги с малым разбрызгиванием металла регулятор ставят на минимум (для рутиловых и основных электродов). Для создания жесткой дуги с большой глубиной проплавления следует установить регулятор на максимум ([рис. 4.3](#)).

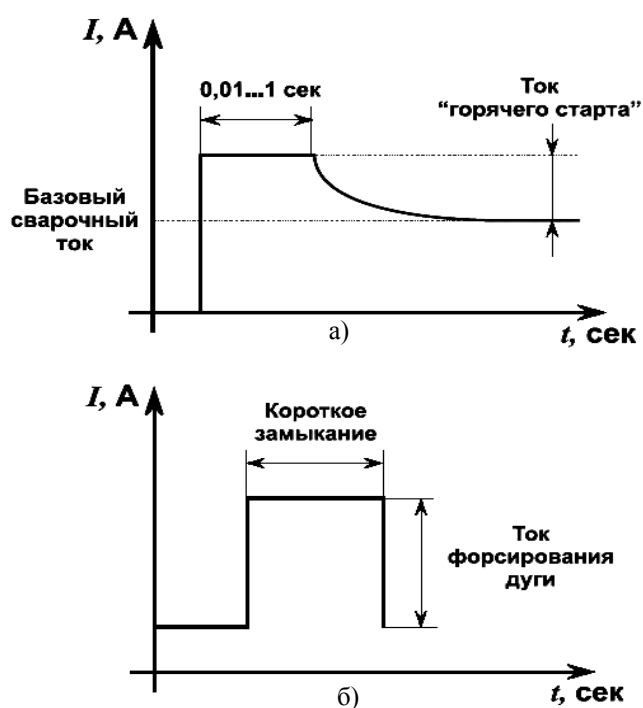


Рис. 4.2. Режимы "Горячий старт" (а), "форсаж дуги" (б)

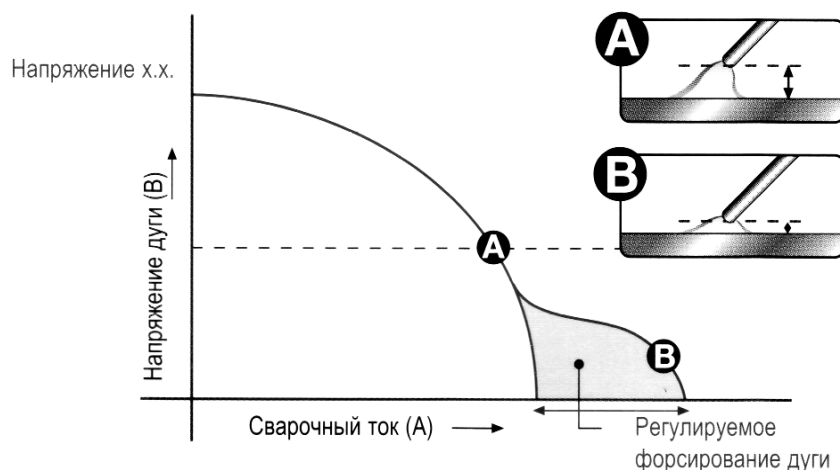


Рис. 4.3. ВАХ источника сварочного тока с регулируемым током форсирования дуги.

3. "Антиприлипание" ("Anti Stick", "Антифриз"). Функция, предотвращающая "прилипание" электрода к изделию во время зажигания дуги. Принцип действия заключается в следующем: если в первоначальный момент касания электродом изделия дуга не зажглась в течение до $\approx 0,8$ сек., источник снижает ток до минимума, что позволяет легко оторвать электрод от детали, поскольку он не успевает расплавиться и "примёрзнуть" к изделию.

4. Индикация тока сварки. Во многих ответственных применениях необходим текущий контроль тока сварки. Измерение сварочного тока может производиться обычным стрелочным амперметром, либо с помощью цифрового дисплея, отображающего до начала сварки предустановленное, а в режиме сварки – фактическое значение сварочного тока.

5. Регулировка наклона ВАХ. С помощью этой функции можно настраивать свойства дуги в зависимости от типа применяемых электродов. В частности для заварки корневых швов целлюлозными электродами наклон ВАХ рекомендуется уменьшать.

6. Импульсный режим (пульсирующая дуга). Сварочный ток варьируется между двумя установленными значениями (пиковым и базовым). Частота импульсов регулируется в пределах от 0,25 до 25 Гц. Эта функция обычно применяется для сварки тонколистовых деталей, нержавеющей стали, деталей разной толщины и позволяет в большей степени контролировать процесс сварки в любых пространственных положениях для получения более качественного сварного шва.

7. Дистанционное управление (ДУ). Полнопанельный пульт ДУ с индикацией режимов позволяет полноценно управлять процессом сварки на расстояниях до нескольких десятков метров от источника. В большинстве применений ДУ достаточно наличия оперативных регулировок и лампы подсветки зоны сварки.

8. Питание от автономных генераторов. Работа в полевых условиях требует возможности питания источника от автономных электрогенераторов ограниченной мощно-

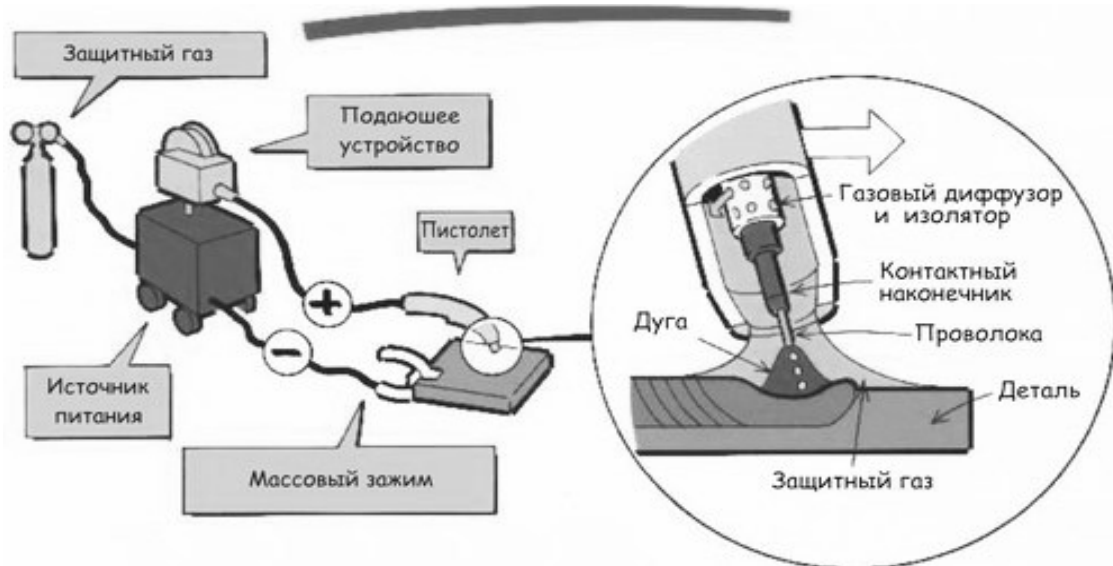
сти. Основным параметром, ограничивающим эту возможность, является коэффициент мощности K_M . При токе потребления близком по форме к синусоидальному и совпадающему по фазе с напряжением, K_M близок к единице, и питание от автономного генератора не представляет проблемы. Сдвиг по фазе приводит к уменьшению K_M с вытекающим отсюда увеличением загрузки генератора.

Проблемы возникают, если ток потребления носит прерывистый емкостной характер, типичный для инверторных источников. Во-первых, существенно растет габаритная мощность, снижается K_M , вынуждая применять более мощные генераторы при той же мощности в дуге, либо снижать мощность нагрузки, например количество постов. Во-вторых, и что более существенно, индуктивная реакция генератора в сочетании с емкостным характером входного сопротивления инвертора приводит к возникновению резонансных явлений, вызывающих искажения формы напряжения генератора и существенные перенапряжения. Приемлемым выходом для инверторных источников является введение в цепи питания корректора коэффициента мощности (для однофазных источников), либо фильтра нижних частот (для трехфазных), исправляющего форму потребляемого тока.

9. Ограничение напряжения холостого хода. При работах в условиях повышенной опасности поражения электрическим током напряжение холостого хода должно автоматически снижаться до значения не более 12 В за время не более 0,6 секунды после размыкания сварочной цепи. Эта функция полезна не только в опасных условиях, однако, некоторые технологии становятся недоступны, например, сварка с отрывом с периодом более 0,6 сек. Поэтому должна быть предусмотрена возможность эту функцию санкционировано отключать.

10. Защитные функции. К ним относятся функции, обеспечивающие надежную безаварийную работу оборудования: защита от отклонений более допустимых значений напряжения и частоты питающей сети (монитор питания), защита от перегрева термонапряженных элементов, защита от длительного (более 5 сек.) короткого замыкания в нагрузке. При возникновении аварийного события выходное напряжение снижается до нуля, а при необходимости источник отключается от сети. Источник должен полностью восстанавливать свою работоспособность при снятии аварийной ситуации.

5. Сварка MIG/MAG.



MIG/MAG (Metal Inert/Active Gas) – дуговая сварка плавящимся металлическим электродом (проволокой) в среде инертного/активного газа с автоматической подачей присадочной проволоки.

Сущность способа.

Это [полуавтоматическая сварка](#) в среде защитного газа – наиболее универсальный и распространенный в промышленности метод сварки ([рис. 5.1](#)). Иногда этот метод сварки обозначают **GMA (Gas Metal Arc)**. Применение термина "полуавтоматическая" не вполне корректно, поскольку речь идет об автоматизации только подачи присадочной проволоки, а сам метод MIG/MAG с успехом применяется при автоматизированной и роботизированной сварке. Словосочетание "в углекислом газе", к которому привыкли многие специалисты, умышленно упущено, так как при этом методе все чаще используются многокомпонентные газовые смеси, в состав которых помимо углекислого газа могут входить аргон, кислород, гелий, азот и другие газы.

В зависимости от свариваемого металла и его толщины в качестве защитных газов используют инертные, активные газы или их смеси. В силу физических особенностей стабильность дуги и ее технологические свойства выше при использовании постоянного тока обратной полярности (минус на изделии). При использовании постоянного тока прямой полярности (плюс на изделии) количество расплавляемого электродного металла увеличивается на 25...30 %, но резко снижается стабильность дуги, и повышаются потери металла на разбрызгивание. Применение переменного тока невозможно из-за нестабильного горения дуги.

При сварке плавящимся электродом шов образуется за счет проплавления основного металла и расплавления дополнительного металла – электродной проволоки. Поэтому форма и размеры шва помимо прочего (скорости сварки, пространственного положения

электродов и изделия и др.) зависят также от характера расплавления и переноса электродного металла в сварочную ванну. Характер переноса электродного металла определяется в основном материалом электрода, составом защитного газа, плотностью сварочного тока и рядом других факторов.



Рис. 5.1. Полуавтоматическая сварка в среде защитного газа.

При традиционном способе сварки можно выделить *три основные формы* расплавления электрода и переноса электродного металла в сварочную ванну: с короткими замыканиями, капельный, струйный (рис. 5.2). Процесс сварки с периодическими короткими замыканиями характерен для сварки электродными проволоками диаметром 0,5...1,6 мм при короткой дуге с напряжением 15...22 В. После очередного короткого замыкания (поз.1 на рис. 5.2,а) силой поверхностного натяжения расплавленный металл на торце электрода стягивается в каплю (поз. 2, 3). В результате длина и напряжение дуги становятся максимальными.

Во все стадии процесса скорость подачи электродной проволоки постоянна, а скорость ее плавления изменяется и в периоды 3 и 4 меньше скорости подачи.

Поэтому торец электрода с каплей приближается к сварочной ванне (длина дуги и ее напряжение уменьшаются) до короткого замыкания (поз. 5). При коротком замыкании резко возрастает сварочный ток и как результат этого увеличивается сжимающее действие электромагнитных сил, совместное действие которых разрывает перемычку жидкого металла между электродом и изделием. Во время короткого замыкания капля расплавленного электродного металла переходит в сварочную ванну. Далее процесс повторяется.

Частота периодических замыканий дугового промежутка может изменяться в пределах 90...450 в секунду. Для каждого диаметра электродной проволоки в зависимости от материала, защитного газа и т.д. существует диапазон сварочных токов, в котором возможен процесс сварки с короткими замыканиями. При оптимальных параметрах процесса сварка

возможна в различных пространственных положениях, а потери электродного металла на разбрызгивание не превышают 7 %.

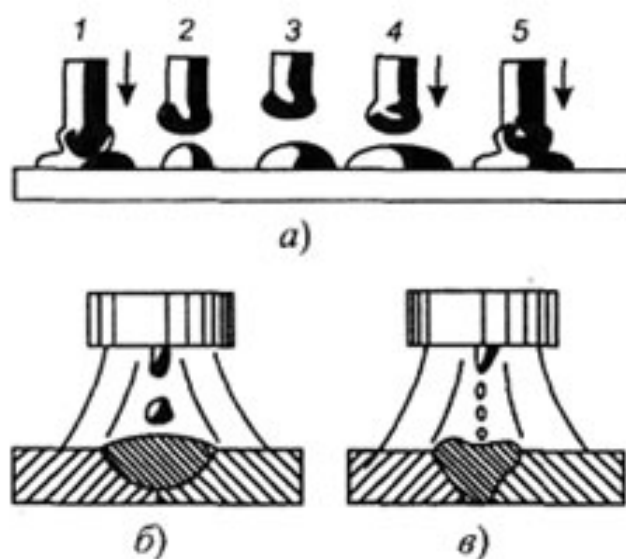


Рис. 5.2. Основные формы расплавления и переноса электродного металла:

а) – короткими замыканиями; б) – капельный; в) – струйный.

Увеличение плотности сварочного тока и длины (напряжения) дуги ведет к изменению характера расплавления и переноса электродного металла, перехода от сварки короткой дугой к процессу с редкими короткими замыканиями или без них. В сварочную ванну электродный металл переносится нерегулярно, отдельными крупными каплями различного размера ([рис. 5.2,б](#)), хорошо заметными невооруженным глазом. При этом ухудшаются технологические свойства дуги, затрудняется сварка в потолочном положении, а потери электродного металла на угар и разбрызгивание возрастают до 15 %.

Для улучшения технологических свойств дуги применяют периодическое изменение ее мгновенной мощности – *импульсно-дуговая сварка* ([рис. 5.3](#)). Теплота, выделяемая основной дугой, недостаточна для плавления электродной проволоки со скоростью, равной скорости ее подачи.

Вследствие этого длина дугового промежутка уменьшается. Под действием импульса тока происходит ускоренное расплавление электрода, обеспечивающее формирование капли на его конце. Резкое увеличение электродинамических сил сужает шейку капли и сбрасывает ее в направлении сварочной ванны в любом пространственном положении.

Можно использовать одиночные импульсы ([рис. 5.3](#)) или группу импульсов с одинаковыми или различными параметрами. В последнем случае первый или первые импульсы ускоряют расплавление электрода, а последующие сбрасывают каплю электродного металла в сварочную ванну. Устойчивость процесса зависит от соотношения основных параметров (величины и длительности импульсов и пауз). Соответствующим подбором тока основной дуги и импульса можно повысить скорость расплавления электродной проволо-

ки, изменить форму и размеры шва, а также уменьшить нижний предел сварочного тока, обеспечивающий устойчивое горение дуги.

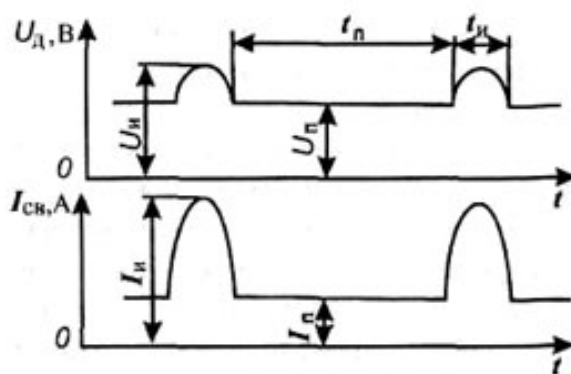


Рис. 5.3. Изменение тока и напряжения дуги при импульсно-дуговой сварке, где I_n , U_n – ток и напряжение основной дуги; I_n , U_n – ток и напряжение дуги во время импульса; t_n , t_n – длительность паузы и импульса.

При достаточно высоких плотностях постоянного по величине (без импульсов или с импульсами) сварочного тока обратной полярности и при горении дуги в инертных газах может наблюдаться очень мелкокапельный перенос электродного металла. Название "струйный" он получил потому, что при его наблюдении невооруженным глазом создается впечатление, что расплавленный металл стекает в сварочную ванну с торца электрода непрерывной струей ([рис. 5.2,в](#)). Изменение характера переноса электродного металла с капельного на струйный происходит при увеличении сварочного тока до "критического" для данного диаметра электрода.

Значение критического тока уменьшается при активировании электрода (нанесении на его поверхность тем или иным способом некоторых легкоионизирующих веществ), увеличении вылета электрода. Изменение состава защитного газа также влияет на значение критического тока. Например, добавка в аргон до 5 % кислорода снижает значение критического тока. При сварке в углекислом газе без применения специальных мер получить струйный перенос электродного металла невозможно. Он не получен и при использовании тока прямой полярности. При переходе к струйному переносу поток газов и металла от электрода в сторону сварочной ванны резко интенсифицируется благодаря сжимающему действию электромагнитных сил. В результате под дугой уменьшается прослойка жидкого металла, в сварочной ванне появляется местное углубление. Повышается теплопередача к основному металлу, и шов приобретает специфическую форму с повышенной глубиной проплавления по его оси. При струйном переносе дуга очень стабильна – колебаний сварочного тока и напряжений не наблюдается. Сварка возможна во всех пространственных положениях.

Сварка самозащитной проволокой происходит без применения защитного газа. Флюсы, находящиеся в сердечнике проволоки во время сварки выделяют газы и шлак, за-

щающие ванну и горячий затвердевший металл шва (рис. 5.4).



Рис. 5.4. Сварка самозащитной порошковой проволокой.

Требования к оборудованию.

Сварка в защитных газах плавящимся электродом выполняется только на постоянном токе. Используемые источники обладают крутопадающими, пологопадающими, жесткими и возрастающими внешними статическими характеристиками. Выбор статических и динамических характеристик источников диктуется видом процесса сварки. Так, для большинства случаев сварки без коротких замыканий дугового промежутка, осуществляемых при постоянной скорости подачи проволоки рекомендуется использовать источники питания с пологопадающими, жесткими или пологовозрастающими статическими характеристиками и высокими или средними скоростями нарастания силы тока короткого замыкания. Оптимальные для большинства случаев скорости равны 70—110 кА/с.

Для сварки с крупнокапельным переносом и редкими короткими замыканиями в углекислом газе, азоте, гелии или аргоне проволоками диаметром более 1,6 мм рекомендуют использовать источники с пологопадающей внешней характеристикой и низкими скоростями нарастания $I_{кз}$. При сварке в аргоне проволоками больших диаметров на малых и средних токах рекомендуют использовать источники с крутопадающей внешней характеристикой и низкой скоростью нарастания $I_{кз}$ источника питания.

При сварке проволоками малых диаметров (0,5—1,4 мм) с частыми короткими замыканиями разрядного промежутка, когда процесс фактически является импульсным и источник питания работает в переходном режиме, рекомендуется использовать источники с пологопадающей или жесткой внешней характеристикой $|R_0| < 0,08$ В/А и высокими скоростями нарастания $I_{кз}$. При этом для уменьшения разбрызгивания необходимо, чтобы пики тока короткого замыкания были небольшими.

Опытом установлено, что при сварке порошковыми проволоками, а также при сварке под флюсом источники питания с пологопадающими внешними характеристиками и

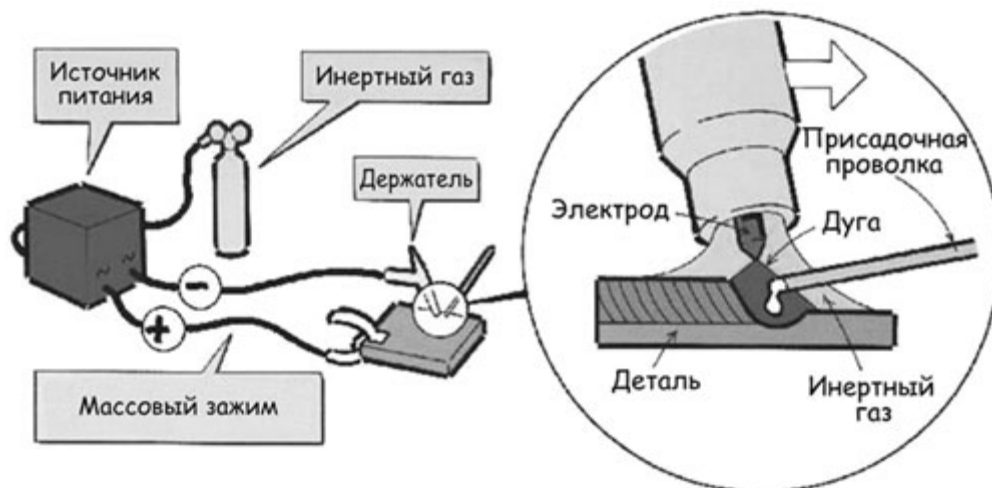
высокими скоростями нарастания $I_{кз}$ обеспечивают высокую стабильность процесса и высокое качество швов.

$ПВ$ на максимальном токе для механизированных способов сварки должен составлять не менее 60...100%.

Для достижения оптимальных технологических свойств в качестве дополнительных функций могут предусматриваться:

- цифровой интерфейс с индикацией параметров режима сварки,
- регулировка наклона ВАН,
- регулировка скорости нарастания $I_{кз}$,
- импульсный перенос металла,
- управляемый каплеперенос металла,
- технология HIGH-SPEED,
- синергетическое управление сварочным процессом,
- возможность питания от автономных генераторов,
- дистанционное управление,
- необходимые защитные функции.

6. Сварка TIG.



TIG (Tungsten Inert Gas) – ручная дуговая сварка неплавящимся электродом в среде инертного защитного газа.

Сущность способа.

Поскольку чаще всего в качестве материала для неплавящихся электродов используется *вольфрам*, в немецкоязычной литературе используют сокращение **WIG (Wolfram Inert Gas)**, иногда встречается обозначение **GTA (Gas Tungsten Arc)**. Может осуществляться с ручной или автоматической подачей присадочной проволоки или без нее. Так как наиболее распространено применение в качестве защитного газа аргона, за этим методом закрепилось название "[аргонодуговая сварка](#)" или АДС. Следует, однако, заметить, что такое наименование не совсем правильно, потому что при сварке методом TIG в качестве защитного газа могут использоваться также гелий, азот или различные газовые смеси. Кроме того, сварка с использованием аргона в качестве защитного газа может вестись и с применением плавящегося электрода. При описании оборудования для сварки методом TIG упоминание самого метода сварки обычно дополняют упоминанием рода тока сварки: DC (Direct Current) – постоянный ток или AC/DC (Alternating Current/Direct Current) – переменный/постоянный ток.

Сварка вольфрамовым электродом в защитном инертном газе – это сварочный процесс, в котором сварочная дуга горит между неплавящимся вольфрамовым электродом и металлом свариваемого изделия ([рис. 6.1](#)). Среда защитного инертного газа, обычно аргона, защищает сварочную ванну. Сварка может проводиться посредством плавления металла самого свариваемого изделия или с применением присадочного материала по химическому составу сходного с основным металлом.

Присадочный материал плавится электрической дугой. Зажигание дуги достигается путем касания изделия электродом и дальнейшим плавным поднятием его на несколько миллиметров (зажигание точечным касанием) или с использованием высоковольтного разряда (зажигание с помощью осциллятора).

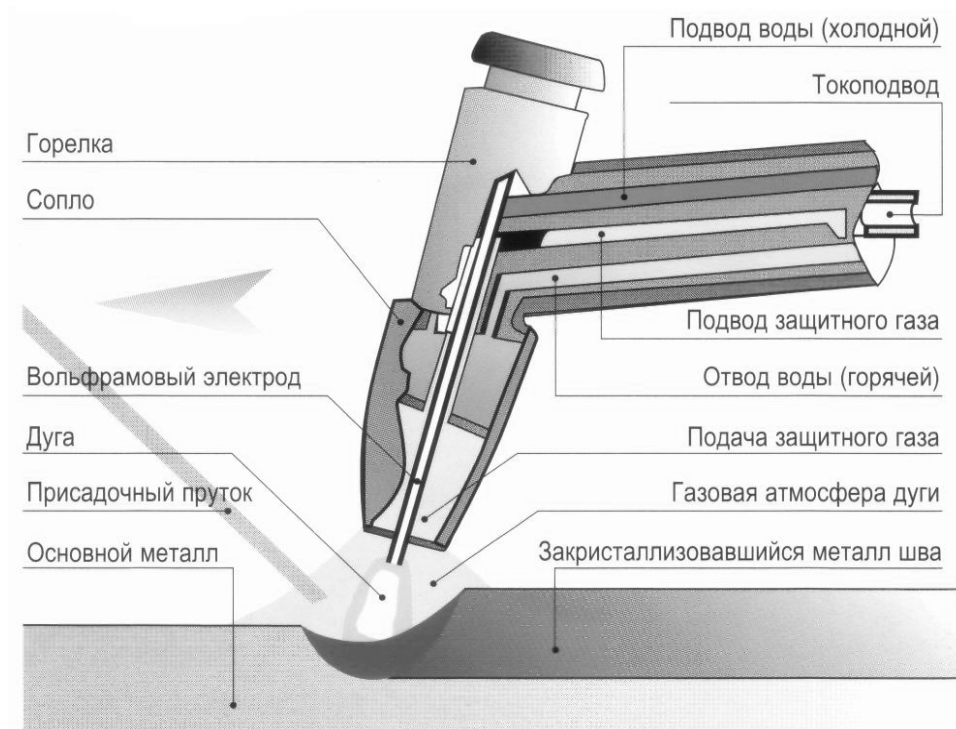


Рис. 6.1. Ручная дуговая сварка неплавящимся электродом в среде инертного защитного газа.

Существуют следующие виды аргонодуговой сварки:

- на постоянном токе, для использования с множеством материалов (сталь, нержавеющая сталь),
- на переменном токе, что оптимально для сварки алюминия и других металлов, содержащих тугоплавкие оксиды на поверхности.

Постоянный ток прямой полярности (плюс на изделии) используется для TIG-сварки большинства материалов и повышения производительности процесса. Сварка на этой полярности увеличивает проплавляющую способность дуги и обеспечивает высокую стойкость вольфрамового электрода. Сварочная дуга на прямой полярности легко возбуждается и горит устойчиво при напряжении 10...15 В в широком диапазоне сварочных токов. Сварка на прямой полярности также позволяет выполнять высококачественные швы на тонколистовых конструкциях и часто используется при сварке корневых швов трубных соединений. Обратная полярность используется редко, поскольку уменьшается устойчивость горения дуги, возрастает напряжение, уменьшается стойкость вольфрамового электрода против термической эрозии, повышается температура его нагрева и расход.

Аргонодуговая сварка на переменном токе отлично подходит для сварки алюминия и других материалов с тугоплавкими поверхностными оксидными пленками. Полуволна тока прямой полярности используется для проплавления основного металла и формирования сварочной ванны, обратная полярность служит для удаления оксидных пленок и очистки сварочной поверхности.

Требования к оборудованию.

Применяются функции, улучшающие качество сварного шва:

- крутопадающая вольтамперная характеристика,
- двухтактный/четырёхтактный режим управления кнопкой горелки,
- режим управления кнопкой горелки с удержанием "пилотной" дуги,
- сварка пульсирующей дугой,
- сварка высокочастотной пульсирующей дугой,
- регулировка скорости (времени) нарастания сварочного тока,
- регулировка скорости (времени) спада сварочного тока ("заварка кратера"),
- регулировка времени предварительной продувки защитного газа ("предгаз"),
- регулировка времени продувки газа после окончания процесса сварки ("постгаз"),
- регулировка частоты и баланса переменного тока (для АС-сварки),
- зажигание дуги точечным касанием,
- то же с использованием функции "Lift",
- зажигание дуги с использованием осциллятора,
- то же с использованием технологии "микро-старт" для сварки на малых токах.

Зажигание дуги точечным касанием позволяет сварщику зажечь дугу, путем плавного отрыва вольфрамового электрода от изделия ([рис. 6.2.а](#)). При этом не исключается наличие вольфрамовых включений в сварном шве и подгорание неплавящегося электрода. Также эта функция часто ставится в качестве опции на источники питания для ручной дуговой сварки. Эта функция преимущественно используется в условиях, когда процесс сварки проводится рядом с оборудованием, которое чувствительно к электромагнитным помехам. Функция "Lift" в сочетании с "пилотной" дугой исключает подгорание электрода и наличие вольфрамовых включений в сварном шве.

При зажигании дуги с использованием осциллятора, электрод не касается изделия ([рис. 6.2.б](#)). Высоковольтный разряд зажигает дугу. В этом случае нет опасности включения вольфрама в металл сварочного шва. Возбуждение дуги с помощью осциллятора используется для высокоточной и высококачественной аргонодуговой сварки.



Рис. 6.2. Зажигание дуги касанием электрода (а), с помощью осциллятора (б).

Регулируемая скорость спада тока в конце процесса сварки позволяет избежать образования кратера в конце сварочного шва.

Регулируемое время продувки газа после окончания процесса сварки обеспечивает охлаждение сварочной ванны в защитной атмосфере, также предотвращает окисление вольфрамового электрода.

При аргонодуговой сварке импульсной дугой сварочный ток варьируется между двумя установленными значениями (пиковым и базовым) с частотой в пределах от 0,25 Гц до 25 Гц. Эта функция отлично подходит для сварки нержавеющей стали, тонколистовых деталей и деталей разной толщины. Процесс в большей степени поддается контролю для получения более качественного сварного шва.

При сварке высокочастотной импульсной дугой сварочный ток имеет такой же вид, как и импульсный, но частота импульсов выше (обычно в пределах от 20 до 500 Гц). Дуга более сфокусирована и, как результат, зона термического влияния меньше ([рис. 6.3](#)).

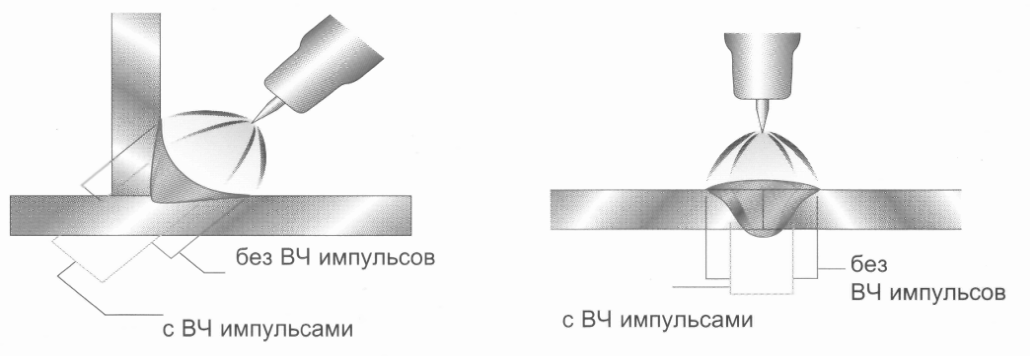


Рис. 6.3. Влияние высокочастотной пульсирующей дуги.

Ток "пилотной" дуги (стартовый ток/ток заварки кратера) должен иметь возможность регулироваться для различных задач с целью улучшения контроля сварочной ванны.

7. Плазменная дуговая сварка.

Сущность способа.

Плазменная сварка – это сварка плавлением, при которой нагрев проводится направленным потоком дуговой *плазмы* (плазменной струей). Процесс осуществляется по схеме прямого действия. Плазменный способ является развитием сварки в среде аргона вольфрамовым электродом ([рис. 7.1](#)) и отличается от него следующими процессами:

- принудительное вдувание в дугу плазмообразующего газа,
- сжатие дуги за счёт размещения её в специальном плазмотроне.

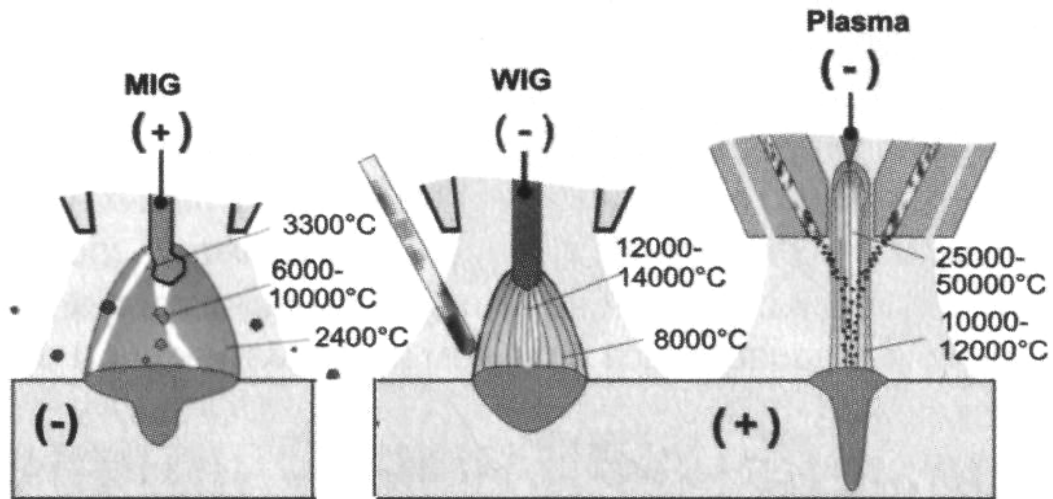


Рис. 7.1. Отличительные особенности MIG/MAG, TIG и плазменного способов сварки.

В основе процесса лежит струя ионизированного инертного газа (плазма). Под действием плазменной струи происходит расплавление металлов до определенной глубины. После кристаллизации сварочной ванны образуется сварочное соединение.

В качестве плазмообразующего газа используется аргон, реже аргон с примесями водорода или гелия, защитного – аргон или гелий. Схема процесса показана на [рис. 7.2](#).

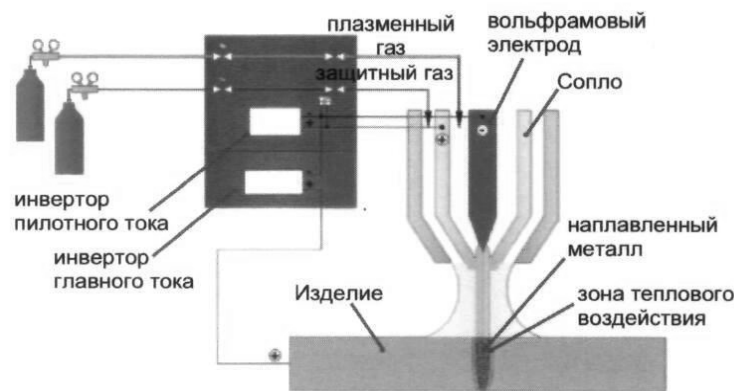


Рис. 7.2. Схема процесса плазменно-дуговой шовной сварки.

Плазмообразующий и защитный газы подаются в плазмотрон и в зону сварки по разным каналам и под разным давлением. Причем расход защитного газа примерно на порядок больше, чем плазмообразующего. На схеме эти каналы абсолютно независимы (два

баллона, два клапана и два редуктора). Рациональнее иметь один баллон, клапан, разветвитель, два управляемых редуктора и два расходомера. Пилотная дуга, зажигаясь между вольфрамовым катодом и плазменным соплом с помощью встроенного осциллятора, инициирует основную дугу между катодом и изделием.

Подача присадочного материала осуществляется вручную (проволоки) или автоматически (проволоки, металлического порошка).

Плазменная дуга отличается от обычной высокой концентрацией энергии и широкими возможностями её регулирования.

Преимущества плазменной дуговой сварки:

- возможна плазменная сварка проникающей дугой, обеспечивающей полное проплавление металлов толщиной до 10 мм без предварительной разделки кромок;
- высокая концентрация дуги – минимальная зона термического воздействия (ЗТВ), меньшее коробление изделия;
- плазменная дуга цилиндрической формы – меньшая критичность к изменению длины дуги, высокая стабильность проплавления и геометрии сварного шва;
- вольфрамовый электрод защищён соплом – нет включений вольфрама в шве;
- высокое качество сварочных швов, не требующих дополнительной обработки;
- высокая скорость сварки до 50 м/ч;
- отличное качество сварки при автоматизации процесса.

Качество сварных соединений сравнимо с качеством швов получаемых при лазерной сварке при существенно меньших затратах.

Применение плазменной сварки:

- авиастроение, ракетная техника, автомобилестроение;
- приборостроение, электронное, электротехническое машиностроение;
- химическое машиностроение, производство резервуаров и котлов;
- пищевая промышленность и другие.

8. Лазерная сварка.

Уникальные свойства лазерного излучения – высокая монохроматичность и когерентность, низкая расходимость позволили создать перспективный вид высококонцентрированного теплового источника энергии. При облучении поверхности тела светом часть энергии квантов поглощается этой поверхностью. Если световую энергию сконцентрировать на малом участке поверхности, можно получить высокую температуру. На этом основана сварка световым лучом оптического квантового генератора – *лазера*. Луч лазера, как сварочный источник энергии, открыл новые технологические возможности в теории и практике сварочных процессов. Лазер, в настоящее время, является единственным доступным сварочным источником энергии, который при атмосферных условиях позволяет получить плотности мощности до 10^8 Вт/см², реализующие режим глубокого проплавления.

Лазерная сварка это одно из направлений применения мощного лазерного излучения. Лазерная сварка является технологией Hi-Тес и применяется, как правило, там, где необходимо обеспечить высокий уровень физико-механических свойств и точности исполнения сварного шва. Так, в мире, лазерную сварку широко используют для производства автомобилей, самолетов, в кораблестроении и в других сложных многоступенчатых производственных линиях. В России лазерную сварку начали активно внедрять только в последние несколько лет. А между тем, технология лазерной сварки стала более изученной и более доступной для применения. Те проблемы, которые стояли перед ней ещё десять лет назад, сейчас решены.

Лазерную сварку следует рекомендовать к применению, когда необходимо получить следующие требования к изделию:

- получение прецизионной конструкции, размеры которой практически не должны меняться в результате сварки;
- малой зоны термического влияния;
- минимальных остаточных напряженных состояний;
- высокой коррозионной стойкости, а также других требований, при которой другие технологии изготовления сварной конструкции не могут выполнить данные условия.

Лазерная сварка обеспечивает существенное увеличение производительности, по сравнению с дуговой сваркой. По сравнению с электронно-лучевой сваркой лазерная сварка не требует вакуумных камер. Что позволяет рекомендовать лазерную сварку для соединения элементов конструкций практически любых габаритов. Одной из отличительных особенностей лазерной сварки является возможность соединения трудносвариваемых материалов, в том числе разнородных.

Лазерное излучение на поверхность материала частично отражается от нее, а час-

тично поглощается. Эффективный КПД процесса сварки по физической сущности является эффективным коэффициентом поглощения лазерного излучения. Ее ведут либо на воздухе, либо в аргоне, гелии, либо в CO_2 и др. Лазерной сваркой можно соединять элементы любых размеров. Лазерное излучение легко передается с помощью оптических систем в труднодоступные места, может одновременно или последовательно использоваться на нескольких рабочих местах. Оптические системы транспортировки и фокусировки лазерного излучения создают возможность легкого и оперативного управления процессом лазерной сварки. В отличие от электронного луча, дуги и плазмы, на лазерный луч не влияют магнитные поля свариваемых деталей и технологической оснастки, что позволяет получать устойчивое качественное формирование сварного шва по всему контуру.

Основные элементы лазера – *генератор накачки и активная среда*. По активным средам различают *твердотельные, газовые и полупроводниковые лазеры*. Для сварки используют твердотельные и газовые лазеры импульсного и непрерывного действия. В твердотельных лазерах ([рис. 8.1](#)) в качестве активной среды чаще всего применяют стержни из розового рубина – окиси алюминия Al_2O_3 с примесью ионов хрома Cr^{3+} (до 0,05%). При облучении ионы хрома переходят в другое энергетическое состояние – возбуждаются и затем отдают запасенную энергию в виде света. На торцах рубинового стержня нанесен слой отражающего вещества (например, серебра) так, что с одного конца образовано непрозрачное, а с другого – полупрозрачное зеркало. Излучение ионов хрома, отражаясь от этих зеркал, циркулирует параллельным пучком через полупрозрачное зеркало и фокусируется линзой в месте сварки. Nd:YAG-лазер – твердотельный лазер на алюмоиттриевом гранате, активированном атомами неодима. Плотность выходной мощности твердотельных лазеров достигает 10^7 Вт/см². В фокусе достигается громадная концентрация энергии, позволяющая получать температуру до миллиона градусов.

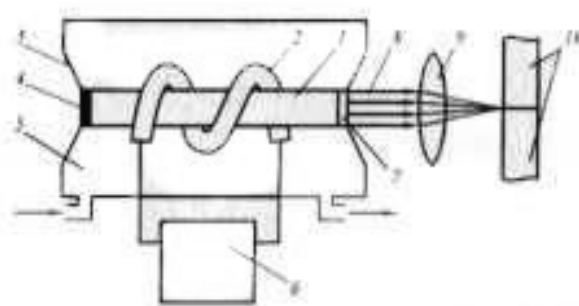


Рис. 8.1. Схема твердотельного лазера: 1) – рубиновый стержень, 2) – генератор накачки, 3) – отражатель, 4) – непрозрачное зеркало, 5) – охлаждающая среда, 6) – источник питания, 7) – полупрозрачное зеркало, 8) – световой луч, 9) – фокусирующая линза, 10) – обрабатываемые детали.

Скорость лазерной сварки непрерывным излучением в несколько раз превышает скорости традиционных способов сварки плавлением. Например, стальной лист толщиной

20 мм электрической дугой сваривают со скоростью 15 м/ч за 5...8 проходов, ширина шва получается 20 мм. Непрерывным лазерным лучом этот лист сваривается со скоростью 100 м/ч за 1 проход, получают ширину шва 5 мм. Однако лазерная сварка импульсным излучением по скорости сопоставима с традиционными способами сварки.

Лазерную сварку можно производить со сквозным и частичным проплавлением. Сварные швы одинаково хорошо формируются в любом пространственном положении. При толщине свариваемых кромок менее 0,1 мм и при сварке больших толщин с глубоким проплавлением по-разному происходит формирование шва и различны подходы к выбору параметров режима сварки. При сварке как непрерывным, так и импульсным излучением малых толщин используют более мягкие режимы, обеспечивающие лишь расплавление металла в стыке деталей без перегрева его до температуры интенсивного испарения. Сварку сталей и других малоактивных металлов можно в этом случае выполнять без дополнительной защиты зоны нагрева, что существенно упрощает технологию, тогда как сварку с глубоким проплавлением ведут с защитой шва газом, состав которого подбирают в зависимости от свариваемого материала.

Широкое применение лазерной сварки сдерживается экономическими соображениями. Стоимость технологических лазеров пока ещё высока, что требует тщательного выбора области применения лазерной сварки. Однако если применение традиционных способов не дает желаемых результатов либо технически неосуществимо, можно рекомендовать лазерную сварку. К таким случаям относится необходимость получения прецизионной конструкции, форма и размеры которой не должны меняться в результате сварки. Лазерная сварка целесообразна, когда она позволяет значительно упростить технологию изготовления сварных изделий, выполняя сварку как заключительную операцию, без последующей правки или механической обработки. Экономически эффективна лазерная сварка, когда необходимо существенно повысить производительность, поскольку скорость ее может быть в несколько раз больше, чем у традиционных способов.

Самой большой группой применений мощных лазеров является лазерная резка металлов ([рис. 8.2](#)), так как прецизионная резка может выполняться с высокой скоростью резания. Преимуществом лазерной сварки является очень малая ширина шва и значительно меньшие сварочные деформации, чем при использовании традиционных методов сварки ([рис. 8.3](#)).

Лазерная маркировка используется для нанесения кодов продукции на различные неровные поверхности компонентов.

Лазерная прошивка позволяет получать крошечные отверстия, которые нельзя получить никаким другим способом, или для этого потребуется приложить очень большие усилия.

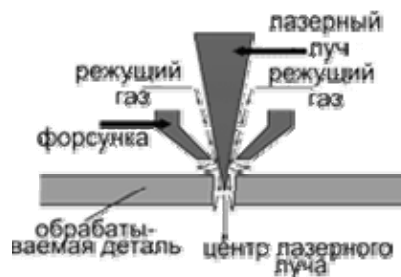


Рис. 8.2. Схема лазерной резки



Рис. 8.3. Деталь после лазерной резки

К лазерной обработке поверхности относится ряд приложений, в том числе отжиг, закалка, наплавка, распыление/нанесение покрытий, очистка поверхностей или скрытых участков поверхностей объекта. Для примера на [рис. 8.4](#) показана схема лазерной наплавки (подварки).

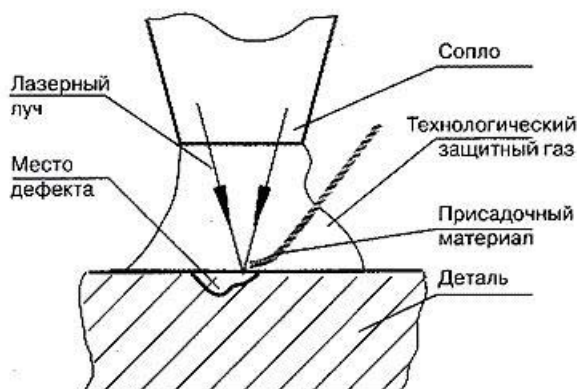


Рис.8.4. Схема лазерной наплавки.

Независимо от конкретного применения, лазеры являются точными и легко регулируемые инструментами, выполняющими обработку без механического контакта с заготовкой. При наблюдении за развитием данной отрасли становится удивительно, как много новых применений возникает почти каждый день.

Однако лазерная сварка не свободна от существенных недостатков, ограничивающих возможности ее применения.

- ✓ Низкий уровень поглощательной способности обрабатываемой поверхности и ее зависимость от длины волны лазерного излучения и температуры является существенным недостатком технологии лазерной обработки, так как приводят к значи-

тельному повышению порогового значения уровня плотности мощности, необходимой для обработки материала.

Воздействие на обрабатываемую поверхность дополнительными источниками нагрева, которое производится одновременно (параллельно) с лазерной сваркой и изменяет физико-оптические свойства поверхности, значительно увеличивает поглощательную способность обрабатываемой поверхности.

- ✓ Существенное значение на свариваемость металлов оказывают термические сварочные циклы. Лазерная сварка обладает *жестким термическим циклом*. Скорость нагрева в сварном шве характеризуется значением $1,4 \cdot 10^4$ град/с. Скорость нагрева в зоне термического влияния в интервале полиморфного превращения сталей составляет $5 \cdot 10^3$ град/с., а скорость охлаждения $5 \cdot 10^2$ град/с. Уменьшение жесткости термического цикла, в определенных случаях, может благоприятно сказываться на свариваемости.

Уменьшение жесткости сварочного термического цикла может быть реализовано одновременным наложением термического цикла лазерной сварки и менее жестких термических циклов других методов сварки, например, индукционной, плазменной, светолучевой, используя их в режиме предварительного или сопутствующего подогрева.

- ✓ Склонность к порообразованию при лазерной сварке алюминиевых сплавов за счет водорода, попадающего в металл сварочной ванны из основного и присадочного металла, может быть уменьшена также путем снижения жесткости термического цикла.
- ✓ Гидродинамическая неустойчивость ванны расплава при высоких скоростях лазерной сварки ($V_{св} > 200$ мм/с), вызывающая нарушение качественного формирования швов в результате образования так называемых "горбов", может быть сглажена использованием дополнительных источников нагрева в виде второго, менее мощного луча, дуги или плазмы.
- ✓ Минимальный объем расплава сварочной ванны и высокое значение коэффициента формы шва при лазерной сварке предъявляют высокие требования к точности геометрии сборки свариваемых деталей и стабильности диаграммы направленности лазерного излучения. Невыполнение этих требований приводит к ослаблению шва, потере конструкционной прочности сварного соединения или к непровару корня шва.

Требования к сборке и диаграмме направленности можно существенно снизить, если использовать гибридную технологию лазерно-дуговой сварки.

- ✓ Общие затраты удельной энергии при лазерной сварке выше по сравнению с менее концентрированными источниками энергии, поэтому объединение различных видов сварки в единый технологический процесс позволяет снизить общие энергозатраты.

Таким образом, соединение лазерной сварки с другими источниками нагрева, в единый технологический процесс, позволяет в значительной мере нивелировать присущие каждому из методов сварки недостатки и, одновременно, получить новое качество, в виде расширения технологических возможностей. В частности, повысить качество сварных соединений и значение верхнего предела скорости сварки, а так же снизить дефектообразование при сварке и себестоимость сварки одного погонного метра шва.

9. Контактная сварка

Контактная сварка – это процесс образования соединения в результате нагрева металла проходящим через него электрическим током и пластической деформации зоны соединения под действием сжимающего усилия.

С помощью контактной сварки изготавливают до 90 % конструкций, свариваемых давлением, и около 50 % всех сварных конструкций. Это объясняется преимуществами контактной сварки перед другими способами:

- экологической чистотой процесса;
- высокой производительностью, определяемой возможностью вести процесс с потреблением большой электрической мощности (время сварки одной точки или стыка составляет 0,02...1,0 с);
- возможностью широкой автоматизации сборочно-сварочных работ, которая позволяет встраивать машины контактной сварки (или сварочную часть машины) в поточные сборочно-сварочные линии;
- высоким и стабильным качеством сварки при небольшом числе управляемых параметров режима, что снижает требования к квалификации сварщика.
- отсутствием потребности в специальных технологических материалах (присадочной проволоке, флюсах, газах и т.д.);
- малым расходом вспомогательных материалов (воды, воздуха);
- относительно высокая культура производства и условий труда.

Недостатками контактной сварки являются относительная сложность оборудования, трудность неразрушающего контроля сварных соединений.

Количество тепла, выделяемого в зоне сварки, определяют по формуле Джоуля-Ленца:

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

где Q – количество тепла, кал; I – сила сварочного тока, А; R – общее сопротивление зоны сварки, Ом; t – время нагревания, с.

Основные способы контактной сварки – это *точечная, шовная (роликовая) и стыковая сварка* ([рис. 9.1](#)).

При точечной сварке детали соединяются на отдельных участках их соприкосновения – точках ([рис. 9.1,а](#), [рис. 9.2](#)). Детали собирают внахлестку, сжимают между электродами из медных сплавов, и пропускают через место сварки короткий импульс тока $I_{св}$. В контакте между деталями металл расплавляется, образуется ядро сварной точки – зона расплавления металла. Под действием сжимающего усилия происходит пластическая деформация металла, по периметру ядра образуется уплотняющий пояс, предохраняющий ядро от окисления и выплеска. Когда расплавленный металл достигает соответствующего

объема, сварочный ток выключается, тепловыделение в деталях прекращается и расплавленный металл кристаллизуется. Через определенное время снимается усилие на электродах и электроды разводятся.

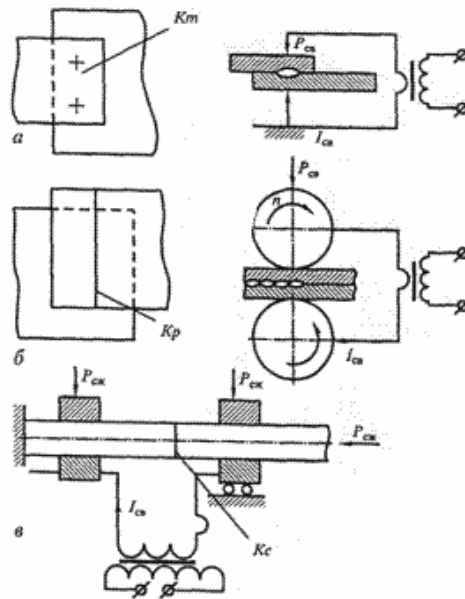


Рис.9.1. Схемы способов контактной сварки:

а) – точечная, б) – шовная, в) – стыковая.

Высота и диаметр ядра определяются по макрошлифу, выполненному по разрезу сварного соединения в плоскости оси электродов. Прочность точечного сварного соединения определяется размерами ядра и его структурой, которые зависят от режима сварки. Режим сварки – это совокупность регулируемых параметров сварочной машины, определяющих формирование сварного соединения.

К основным параметрам режима точечной сварки относятся:

- сварочное усилие сжатия электродов $F_{св}$,
- сварочный ток $I_{св}$,
- время сварки $t_{св}$,
- диаметр плоскости рабочей поверхности электродов $d_{эл}$ или радиус сферы электродов $R_{эл}$ со сферической рабочей поверхностью.

В зависимости от конструктивных особенностей свариваемого изделия и требований, предъявляемых к соединению, толщины и марки свариваемого материала к указанным параметрам режима точечной сварки могут добавляться другие параметры, например усилие предварительного обжатия $F_{обж}$ и ковочное усилие $F_{к}$, которые усложняют цикл сжатия электродов. Сварочный ток также может быть сложной формы и характеризоваться несколькими параметрами или состоять из нескольких импульсов.

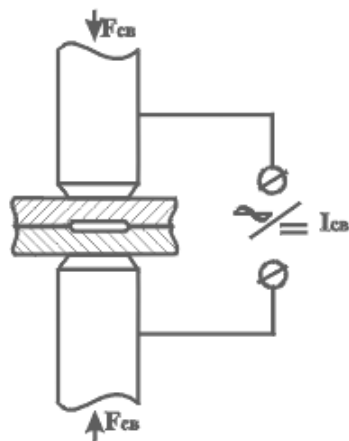


Рис. 9.2. Схема точечной контактной сварки.

Разновидность точечной сварки – *рельефная сварка* ([рис. 9.3](#)). Для ее выполнения на одной из деталей штампуют выступ-рельеф. На рельеф укладывают вторую деталь и производят сварку. Это обеспечивает более концентрированный нагрев в зоне контакта деталей. При образовании сварного ядра рельеф сминается. Рельеф можно выполнять в виде длинного бугорка-валика, тогда можно выполнять рельефную роликовую сварку.

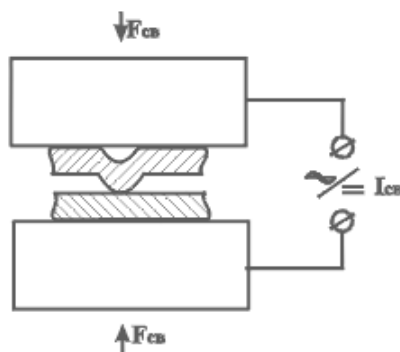


Рис. 9.3. Схема рельефной контактной сварки.

Форма и размеры рельефа определяют процесс сварки и сварное соединение и являются поэтому существенными параметрами режима рельефной сварки. В отличие от точечной сварки рабочая поверхность электрода не является определяющей и этот параметр не входит в режим рельефной сварки.

Шовная сварка происходит так же, как и точечная. Разница между ними в том, что при шовной сварке детали зажимаются между электродами-роликами, которые в процессе сварки вращаются, перемещая свариваемые детали ([рис. 9.1.б](#), [рис. 9.4](#)). Импульсы сварочного тока следуют один за другим с установленной паузой между ними. Совокупность многих точек, взаимно перекрывающих друг друга, образует сплошной сварной шов. Точечной сваркой выполняют только нахлесточные соединения, роликовой, кроме нахлесточного, можно сваривать и стыковые. Для этого на стык листовых деталей накладывают с обеих сторон полоски тонкой (0,3...0,5 мм) фольги из материала свариваемых деталей и сваривают стык с полным проплавлением его толщины.

Режим сварки определяется наряду с параметрами, характерными для точечной сварки: $F_{св}$, $I_{св}$, $t_{св}$, также и параметрами, свойственными шовной сварке: временем паузы между импульсами сварочного тока $t_{п}$, линейной скоростью роликов V , шириной рабочей поверхности цилиндрического ролика S или радиусом заточки ролика со сферической поверхностью $R_{эл}$. Шовная сварка может осуществляться в отдельных случаях непрерывным током.

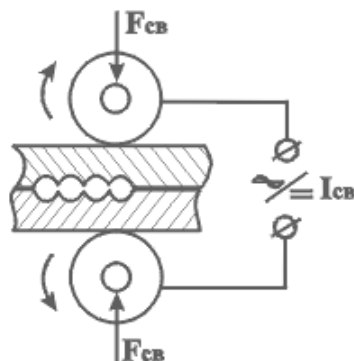


Рис. 9.4. Схема шовной контактной сварки.

Точечную и шовную сварку можно производить и с односторонним подводом сварочного тока, устанавливая оба электрода с одной стороны детали. С обратной стороны устанавливают медную подкладку. Сваривают одновременно две точки или два шва. Применяют одностороннюю сварку при затрудненном доступе к обратной стороне детали и для повышения производительности труда.

При стыковой сварке (рис. 9.1,в, рис. 9.5) соединяют прутки, профильный прокат, трубы по всей площади их торцов. Детали зажимают в электродах-губках, затем прижимают друг к другу соединяемыми поверхностями и пропускают сварочный ток. Различают стыковую сварку *сопротивлением* и *оплавлением*.

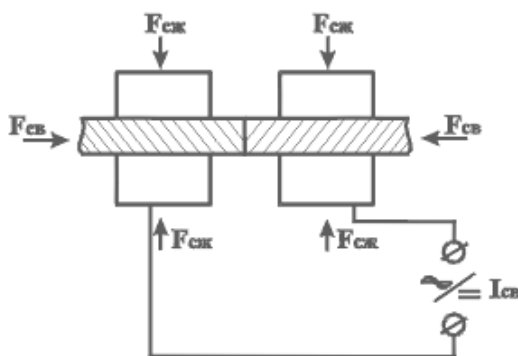


Рис. 9.5. Схема стыковой контактной сварки.

При сварке сопротивлением детали прижимают с большим усилием ($F_{св} = 2...5$ кгс/мм²). Сварочный ток нагревает детали до температуры 0,8...0,9 от температуры плавления. В стыке происходит пластическая деформация, соединения образуется без расплавления металла. Этим способом не всегда удастся обеспечить равномерный нагрев деталей большого сечения по всей площади и достаточно полно удалить из стыка деталей

окисные пленки. Поэтому стыковую сварку сопротивлением применяют только для соединения деталей малого сечения (до 200...300 мм²): проволок, труб, стержней из малоуглеродистых сталей.

При сварке оплавлением детали прижимают друг к другу очень малым усилием при включенном источнике сварочного тока. Отдельные контакты поверхностей мгновенно оплавляются, возникают новые контакты, которые оплавляются тоже. Под действием электродинамических сил жидкие прослойки металла оплавленных контактов вместе с окислами и загрязнениями выбрасываются из стыка деталей. Поверхности постепенно оплавляются, после чего усилие сжатия резко увеличивают – происходит осадка. При этом в течение 0,1 с через стык еще пропускают ток. Жидкий металл вместе с оставшимися окислами вытесняется из зоны стыка в грат – соединение образуется между твердыми, но пластичными поверхностями. При сварке оплавлением химически активных металлов зон соединения защищают инертными газами.