

курс
«Технология сварки спецсталей»

тема 1

**Основы технологии сварочного
производства**

В качестве основной литературы:

Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебник для вузов / В.Б. Арзамасов [и др.]; под ред. В.Б. Арзамасова, А.А. Черепихина. – М.: Академия, 2007. – 446 с.

Материаловедение. Технология конструкционных материалов. Радиационное материаловедение. / Паршин А.М., Тихонов А.Н., Васильев Ю. С., Кириллов Н.Б. – СПб.: СПбГПУ, 2003. – 331 с.

Люшинский, Анатолий Владимирович. Диффузионная сварка разнородных материалов: учебное пособие для вузов / А.В. Люшинский. — М.: Академия, 2006. — 203 с.

Черный, О. М. Электродуговая сварка: практика и теория / О.М. Черный. — Ростов-на-Дону: Феникс, 2007. — 202 с.

Сварка. Резка. Контроль: Справочник в 2 томах / Н. П. Алешин, Г. Г. Чернышев, А. И. Акулов и др.; Под ред. Н. П. Алешина, Г. Г. Чернышова. — М.: Машиностроение, 2004.

В качестве дополнительной литературы

Акулов А.И. Технология и оборудование сварки плавлением. – М.: Машиностроение, 1977 г.

Геворкян В.Г. Основы сварочного дела. – М.: Высшая школа, 1991 г.

Маслов Ю.А. Сварочное производство. – М.: Машгиз, 1960 г.

Закс И.А. Сварка разнородных сталей, справочное пособие. – Л.: Машиностроение, 1987 г.

Кнорозов Б.В., Усова Л.Ф. Технология металлов и материаловедение. – М.: Машиностроение, 1987 г.

Прох Л.Ц. и др. Справочник по справочному оборудованию. – Киев: Техника, 1978

Сущность процесса сварки и область её применения

1. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Сварка, пайка и резка металлов широко применяется в строительной индустрии и промышленности. Это объясняется ее технико-экономическими преимуществами по сравнению с другими способами соединения металлических заготовок и деталей. Экономия металла, ускорение производственного процесса, снижение стоимости продукции и высокое качество сварных соединений сделали сварку прогрессивным технологическим процессом. **Например, при замене клепанных конструкций сварными расход металла сокращается на 15...30%.** Сварка позволяет получать более рациональные конструкции, используя различные профили проката.

Важные направления в обеспечении технологичности сварной конструкции заложены в использовании типизированных и стандартизированных схем, в более широком использовании экономичных профилей проката, гнутых и штампованных элементов, трубчатых профилей и т. п. Это позволяет не только снизить трудоемкость изготовления конструкции, но и в значительной мере сократить затраты на проектные работы.

Высокая технологичность сварных конструкций и упрощение технологии их изготовления являются основой снижения производственных затрат, что выражается в сокращении сроков освоения производства, снижении трудоемкости и себестоимости выпускаемых изделий.

1.1 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ СВАРКИ

1.1.1 Сущность процесса сварки

Сваркой называется процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между свариваемыми поверхностями при их местном или общем нагреве или пластическом деформировании, или совместным действием того и другого.

Для взаимодействия межатомных и межмолекулярных сил притяжения необходимо сблизить соединяемые поверхности на расстояние, близкое к величине параметра кристаллической решетки.

Если торцевые поверхности a и b металлических стержней 1 и 2 идеально чистые (рис. 1.1) с идеально гладкими поверхностями, а кристаллические решетки контактируемых зерен имеют одинаковую ориентацию, то для образования сварного соединения потребуется небольшое усилие сжатия. Эта энергия активации необходима для преодоления некоторого энергетического барьера, т. е. на возбуждение поверхностных атомов и на преодоление сил взаимного отталкивания поверхностей a и b .

Атом K , выходящий на поверхность, отличается от уравновешенного атома M тем, что он имеет одну свободную неуравновешенную связь, т. е. у него нет объекта (атома) взаимодействия в направлении стрелки P , а, следовательно, $P = 0$. Однако атом K взаимодействует с соседними атомами K и атомом M .

Так как в таком состоянии находятся все поверхностные атомы K , то для их приведения в состояние, подобное состоянию атомов M , требуется затрата энергии в виде теплоты (термическая активация) или упругопластической деформации (механическая активация). **Эта энергия возбуждения поверхностных атомов K называется энергией активации.**

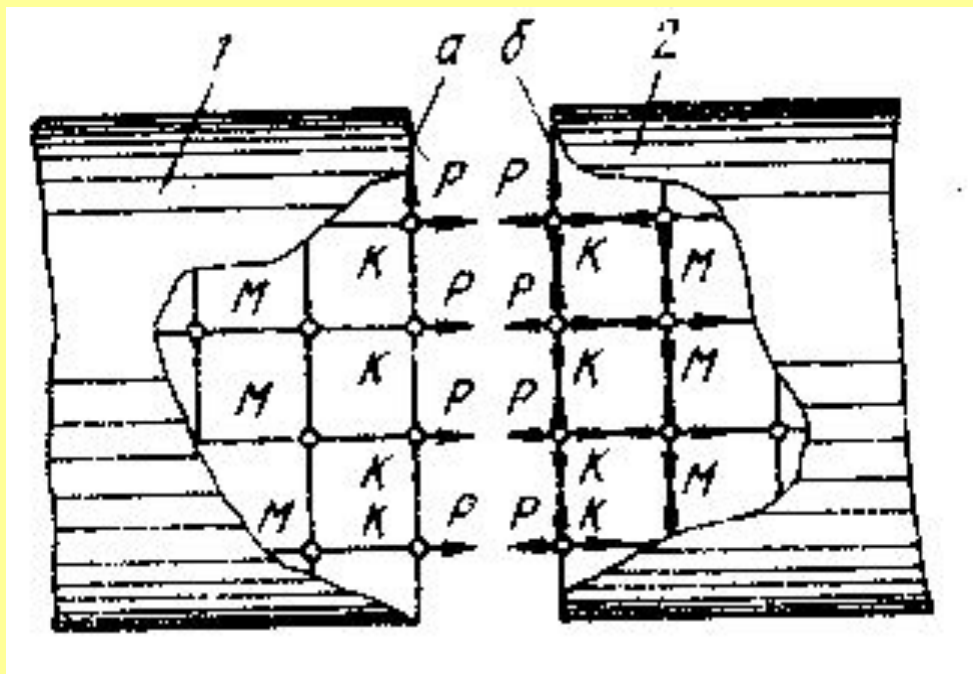
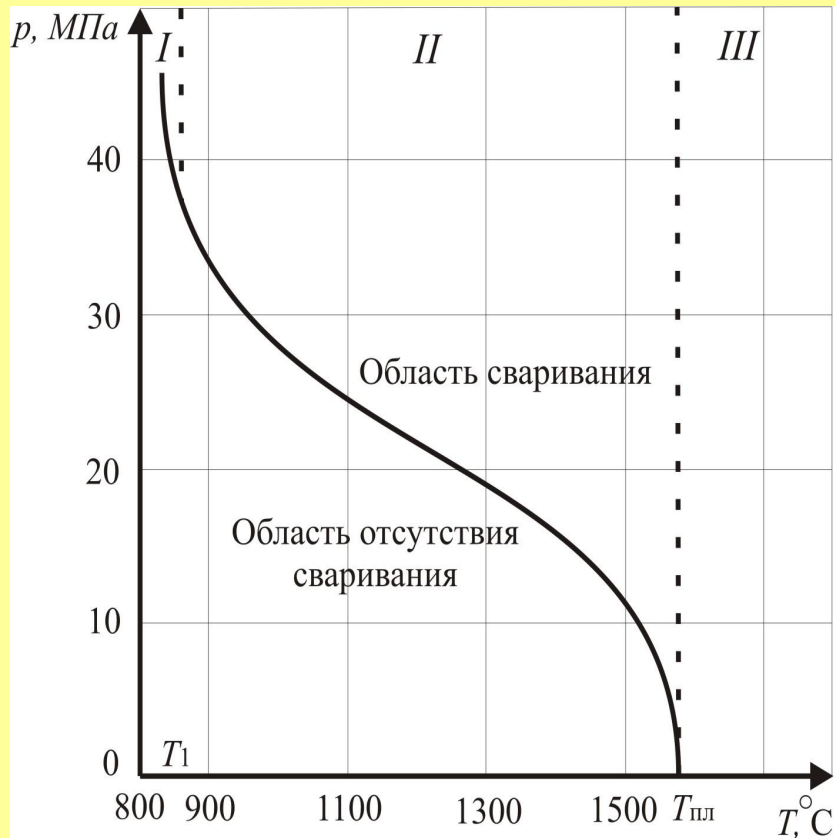


Рис. 1.1 - Схема энергетического состояния идеально чистых поверхностей соединяемых стержней:

K — атомы, выходящие на поверхность и имеющие свободные связи P ; M — атомы взаимно уравновешенные, не имеющие свободных связей

Соединение реальных твердых тел (сварка) затруднена рядом обстоятельств. Реальные тела — поликристаллические. Образование соединения затруднено наличием на поверхности твердых тел различных загрязнений (адсорбированных газов и оксидных пленок), неровностей. Поэтому затраты энергии в реальных условиях превышают требуемую энергию, идеального случая в несколько раз.



Взаимосвязь технологических параметров сварки технически чистого железа:

T - температура нагрева; T_1 - граничная температура;
 $T_{пл}$ - температура плавления p - внешнее давление

Кривая на рисунке разделяет поле технологических параметров на 2 области. В области сваривания образуется высококачественное сварное соединение со свойствами сварного шва, близкими к свойствам основного металла заготовок. В области отсутствия сваривания сварное соединение не может быть получено или образуется сварной шов низкого качества

I – называют область ограниченного сваривания.

II – область сварки давлением.

III – область сварки плавлением.

1.1.2 Классификация способов сварки

По физической сущности образования сварного соединения все виды сварки в соответствии с ГОСТ 19521—74 делятся на три класса; термический, термомеханический и механический (см. табл. 1.1).

Табл. 1.1 – Классификация сварки по физическим признакам

Форма энергии, используемой для образования сварного соединения	Виды сварки
Термическая	Дуговая, электрошлаковая, электронно-лучевая, плазменная, лазерная, импульсно-дуговая, двухдуговая, многодуговая, газовая, термитная
Термомеханическая	Контактная, диффузионная, кузнечная, прессовая, газопрессовая, сварка прокаткой, высокочастотная, печная
Механическая	Холодная, взрывом, ультразвуковая, трением, магнитно-импульсная

К термическому классу относятся виды сварки плавлением, т. е. с местным расплавлением соединяемых частей с использованием тепловой энергии. Основными источниками теплоты при сварке плавлением являются: электрическая дуга, газовое пламя, лучевые источники энергии и т. п.

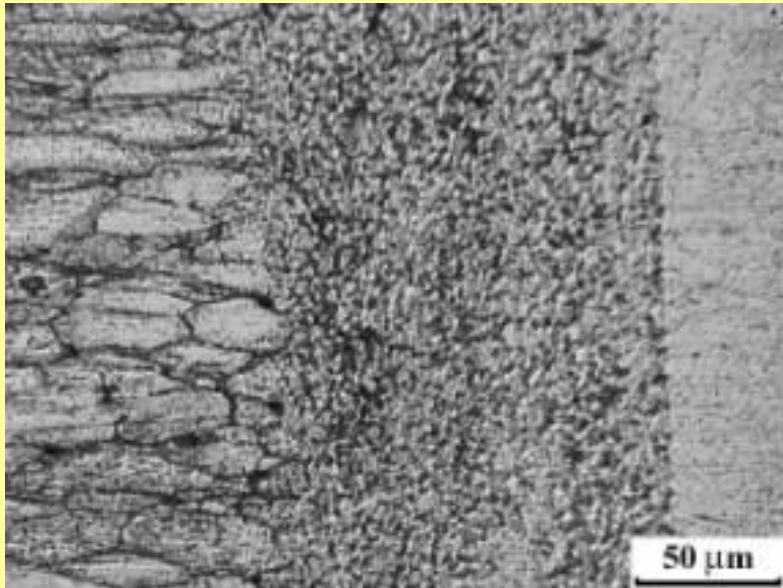
Качество металла шва по многом зависит от его формы и размеров, от свойств присадочного металла и вида сварки, а также от степени защиты расплавленного металла сварочной ванны от взаимодействия с окружающей средой. Создание шлаковой, газовой защиты, а также сварка в вакууме, уменьшает контакт металла с атмосферой или исключает его практически, полностью.



Виды сварки плавлением получили самое широкое распространение в промышленности. По сравнению с другими способами они обладают существенными преимуществами. К ним следует отнести; возможность сварки в полевых условиях, большой диапазон соединяемых толщин, разнообразие применяемых типов соединений, возможность сварки швов во всех пространственных положениях, большое число способов сварки, обладающих различными технологическими возможностями.

К термомеханическому классу относятся виды сварки, при которых образование соединений осуществляется за счет тепловой энергии и давления, необходимого для обеспечения заданной степени пластической деформации металла. Нагрев металла позволяет снизить давление, уменьшить относительную деформацию, необходимую для выполнения соединения. С другой стороны, нагрев и деформация металла вызывают изменение его исходной структуры и свойств. Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании сварных конструкций. Из всех видов сварки, относящихся к термомеханическому классу, наибольшее распространение в промышленности получила **контактная сварка**.

К механическому классу относятся виды сварки, осуществляемые с использованием механической энергии и давления.



Строение границы основной материал - сварной шов (сварка трением алюминиевых сплавов 01570 (зеренная стр-ра) и В1469)

Термомеханические и механические виды сварки имеют определенные преимущества по сравнению с термическими:

Для соединения деталей этими методами затрачивается значительно меньше энергии.

Сварка давлением вызывает меньше изменений в основном металле, чем сварка плавлением.

Термомеханические и механические виды сварки достаточно легко механизуются и автоматизируются, большинство из них обеспечивает высокую производительность

По виду используемой энергии все способы сварки можно разделить на механическую, химическую, электрическую, лучевую, электромеханическую, химико-механическую, а также сварку аккумулированной энергией:

- *механическая* сварка требует осуществления пластической деформации кромок свариваемых заготовок;
- *химическая* сварка характеризуется нагревом металла заготовок до появления расплава в зоне сварки посредством превращения химической энергии в тепловую;
- *электрическая* сварка связана с превращением электрической энергии в теплоту, которое может происходить при прохождении электрического тока через шлак, использовании электрической дуги или индуцировании тока высокой частоты;
- *лучевая сварка* основана на превращении энергии луча света или электронного луча в теплоту (применение лазерного луча или энергии пучка электронов);
- *электромеханическая* сварка основана на нагреве металла заготовок методом электросопротивления с последующим пластическим деформированием;
- при *химико-механической* сварке металл заготовок нагревается вследствие превращения химической энергии в тепловую, а затем осуществляется его пластическое деформирование.

Благодаря различным практическим приспособлениям можно выполнять сварку так, чтобы свести деформацию до минимума. Поэтому сварка должна вестись по тщательно разработанной технологии, включающей в себя особую последовательность операций сварки.

Технология сварки — это план сварки, подробно описывающий последовательность сварочных операций.

2 КЛАССИФИКАЦИЯ И СУЩНОСТЬ ОСНОВНЫХ ВИДОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ

2.1 Дуговая сварка плавлением

Термический класс сварок характеризуется тем, что сварка осуществляется плавлением кромок соединяемых частей. При этом образуется ванна расплавленного металла. После отвода источника нагрева металл сварочной ванны кристаллизуется и образует сварной шов, соединяющий свариваемые части.

Тип сварки определяется видом непосредственно используемого для плавления источника теплоты: дуговая сварка осуществляется теплотой электрической дуги, при электрошлаковой сварке теплота электрической дуги используется лишь в начальный момент, а после расплавления флюса и образования шлака сварка производится теплотой, выделяющейся при прохождении тока через расплавленный шлак.

В промышленности и строительстве получили наибольшее применение следующие основные разновидности дуговой сварки.

Ручная дуговая сварка может производиться двумя способами: неплавящимся и плавящимся электродами. Первый способ (рис. 2.1, а) осуществляют следующим образом. Свариваемые кромки изделия 5 приводят в соприкосновение. Между неплавящимся (угольным, графитовым) электродом 3 и изделием возбуждают дугу 4. Кромки изделия и вводимый в зону дуги присадочный материал 2 нагреваются до плавления и образуется ванночка расплавленного металла. После затвердения металл ванночки образует сварной шов 1. Этот способ используется при сварке цветных металлов и их сплавов, а также при наплавке твердых сплавов. Второй способ (рис. 2.1, б), выполняемый плавящимся электродом, является основным при ручной дуговой сварке. Электрическая дуга 2 возбуждается между металлическим (плавящимся) электродом 1 и свариваемыми кромками изделия 4. Теплота дуги расплавляет электрод и кромки изделия. Получается общая ванна расплавленного металла, которая, охлаждаясь, образует сварной шов 3.

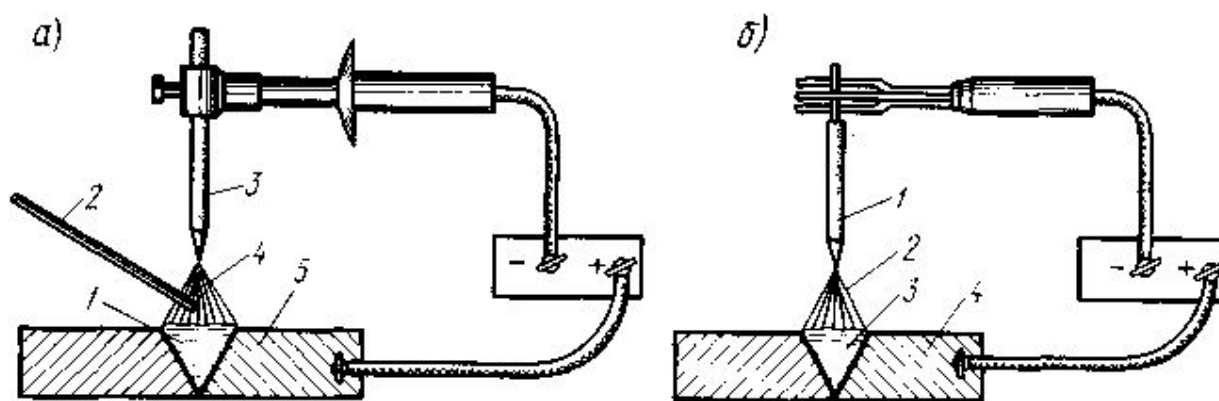
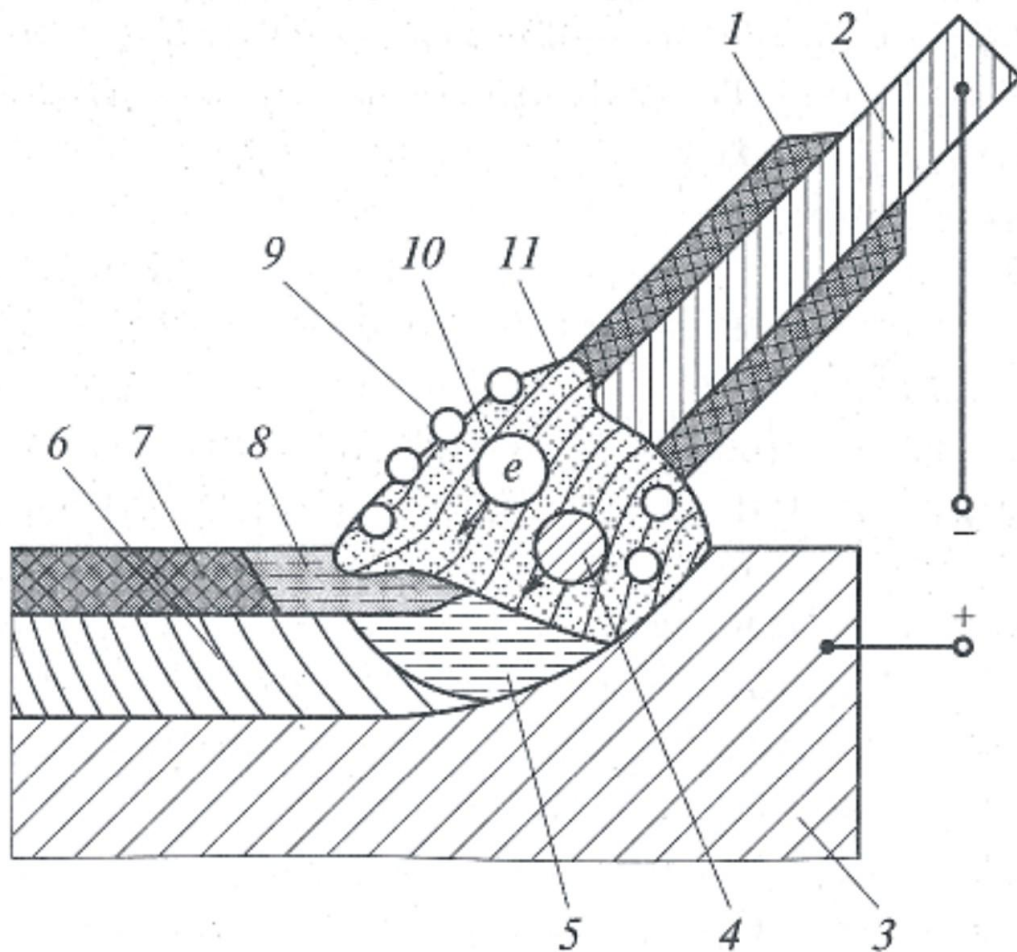


Рис. 2.1 – Схема ручной дуговой сварки неплавящимся электродом (а): 1 – сварной шов; 2 – присадочный материал; 3 – неплавящийся электрод; 4 – электрическая дуга; 5 – изделие. Схема ручной дуговой сварки плавящимся электродом (б): 1 – плавящийся электрод; 2 – электрическая дуга; 3 – сварной шов; 4 – изделие



Ручная дуговая сварка используется для сварки и наплавки всех марок углеродистых и легированных сталей толщиной от 1 до 60 мм, чугуна и цветных металлов, наплавки твердых сплавов на постоянном и переменном токе.

Схема процесса ручной дуговой сварки:
 1 - покрытие; 2 - стержень электрода; 3 - заготовка; 4 - капля расплавленного металла электрода; 5 - ванна жидкого металла; 6 - шов; 7 - шлаковая корка; 8 - шлаковая пленка; 9 - защитная газовая атмосфера; 10 - электрон; 11 - дуга

Автоматическая и полуавтоматическая сварка под флюсом (рис. 2.2) выполняется путем механизации основных движений, выполняемых сварщиком при ручной сварке — подачи электрода 1 вдоль ее оси в зону дуги 2 и перемещения его вдоль свариваемых кромок изделия 7. При полуавтоматической сварке механизирована подача электрода в зону дуги, а перемещение электрода вдоль свариваемых кромок производит сварщик вручную. При автоматической сварке механизированы все операции, необходимые для процесса сварки. Жидкий металл сварочной ванны 5 защищают от воздействия кислорода и азота воздуха расплавленным шлаком 4, образованным от плавления флюса 3, подаваемого в зону дуги. После затвердевания металла сварочной ванны образуется сварной шов 6.

Высокая производительность и хорошее качество швов обеспечили широкое применение автоматической и полуавтоматической сварки под флюсом.

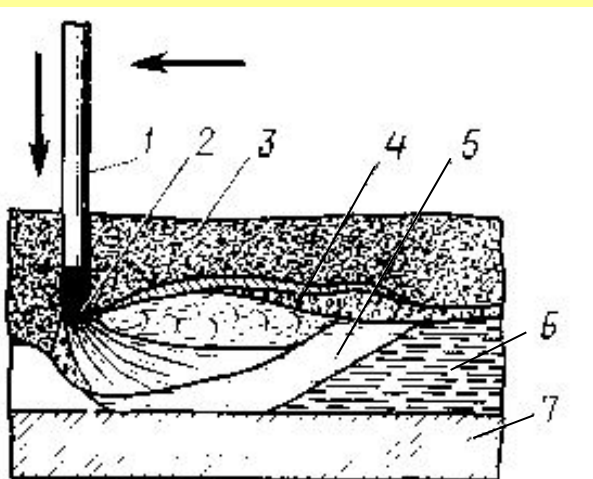
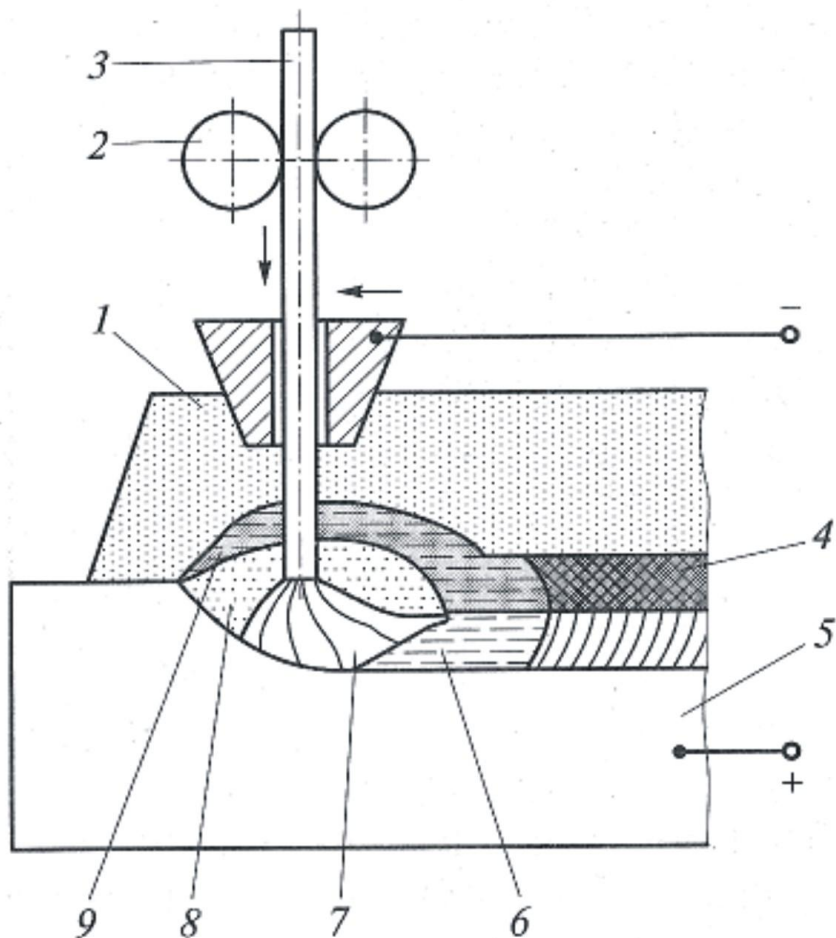


Рис. 2.2 – Схема электродуговой сварки под флюсом: 1 – электрод; 2 – электрическая дуга; 3 – флюс; 4 – расплавленный шлак; 5 – жидкий металл сварочной ванны; 6 – сварной шов; 7 – свариваемое изделие



Дуговая сварка под флюсом используется в промышленности, особенно в крупносерийном производстве ответственных изделий при сварке углеродистых и легированных сталей на переменном и постоянном токе, наплавке, сварке меди.

Схема дуговой сварки под флюсом:
 1 - порошкообразный флюс; 2 - роликовый механизм подачи; 3 - электрод; 4 - шлаковая корка; 5 - заготовка; 6 - ванна расплавленного металла; 7 - дуга; 8 - газовая полость; 9 - расплавленный флюс

Дуговая сварка в защитном газе выполняется неплавящимся (вольфрамовым) (рис. 2.3, а) или плавящимся (рис. 2.3, б) электродом 3. В первом случае сварной шов формируется за счет металла расплавляемых кромок изделия. При необходимости в зону дуги подается присадочный металл 4. Во втором случае подаваемая в зону дуги электродная проволока 3 расплавляется и участвует в образовании сварного шва 1. Защиту расплавленного металла от окисления и азотирования осуществляют струей защитного газа 2, оттесняющего атмосферный воздух из зоны дуги.

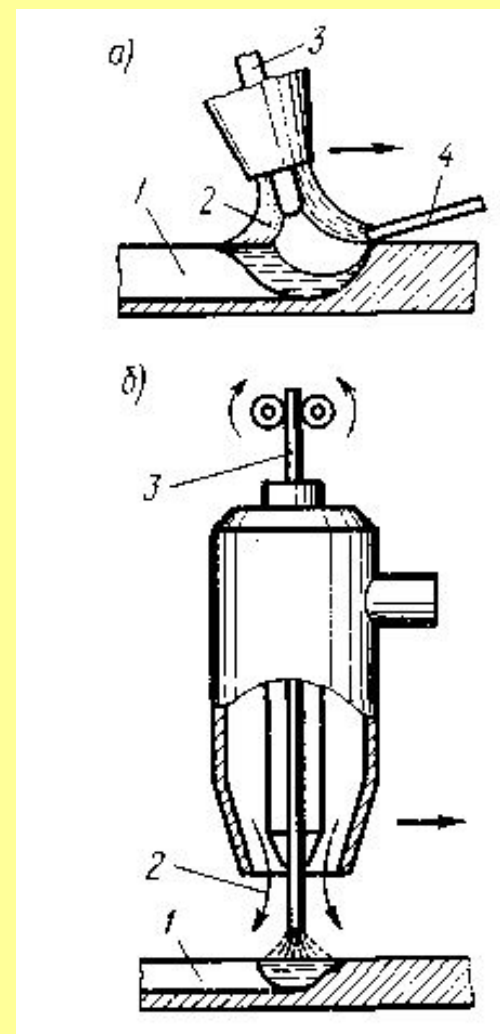


Рис. 2.3 – Электродуговая сварка в защитном газе неплавящимся (вольфрамовым электродом) (а) и плавящимся электродом (б): 1 – сварной шов; 2 – струя защитного газа; 3 – электрод; 4 – присадочный металл

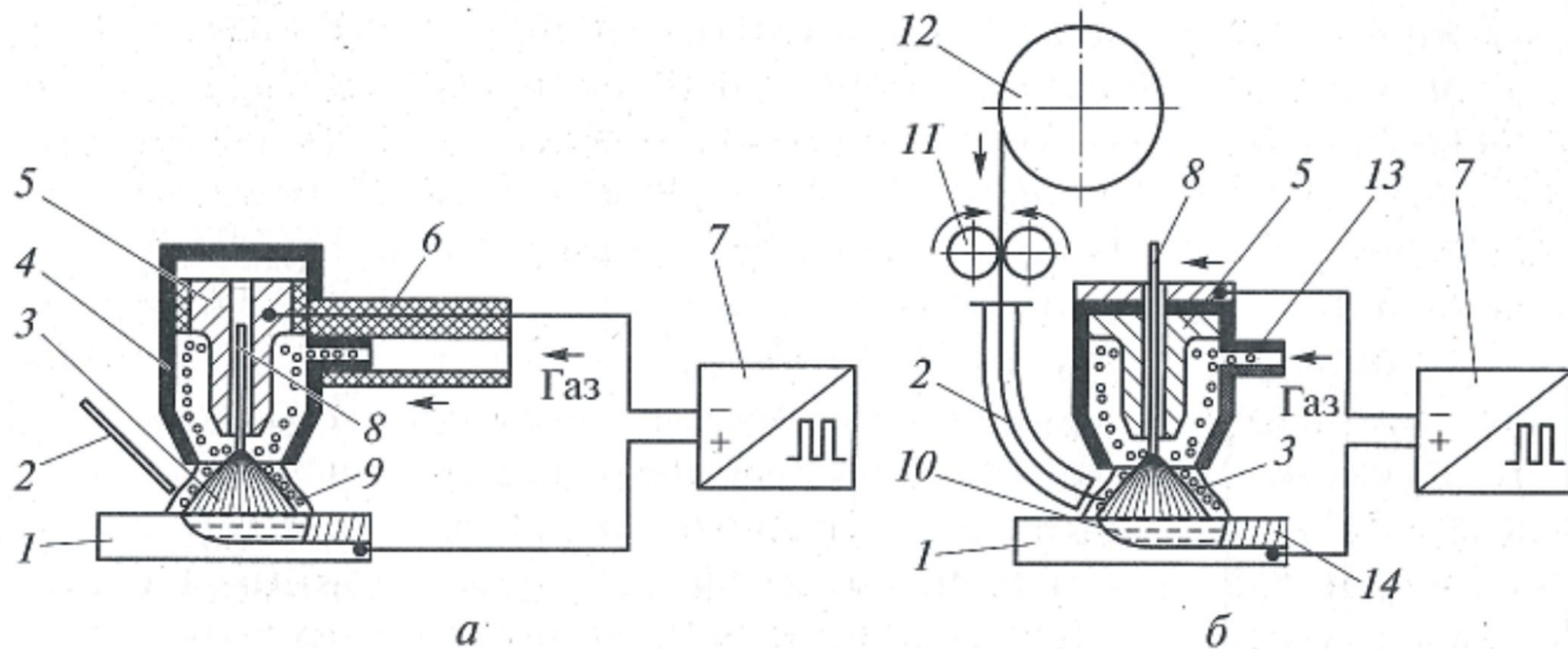


Схема дуговой сварки в защитном газе неплавящимся электродом
а - ручная и *б* - полуавтоматическая сварка:

1 - заготовка; 2 - присадочный пруток; 3 - дуга; 4 - корпус; 5 - мундштук;
 6 - рукоятка; 7 - источник питания; 8 - электрод; 9 - защитный газ; 10 - ванна
 расплавленного металла; 11 - роликовый механизм; 12 - кассета; 13 - патрубок;
 14 - сварной шов

Сварка в защитных газах (аргоне, гелии, углекислом газе) используется при соединении тонкостенных изделий из труб и листов нержавеющей сталей, магниевых и алюминиевых сплавов, титана, циркония и их сплавов.

Электрошлаковая сварка (рис. 2.4) осуществляется путем сплавления металла свариваемых кромок изделия 1 и электрода 2 теплотой, выделяемой током при прохождении через расплавленный шлак 3. Кроме того, шлак защищает расплавленный металл 4 от воздействия воздуха. Формирование сварного шва 5 осуществляется с помощью движущихся вдоль кромок медных ползунов 6 с водяным охлаждением 7.

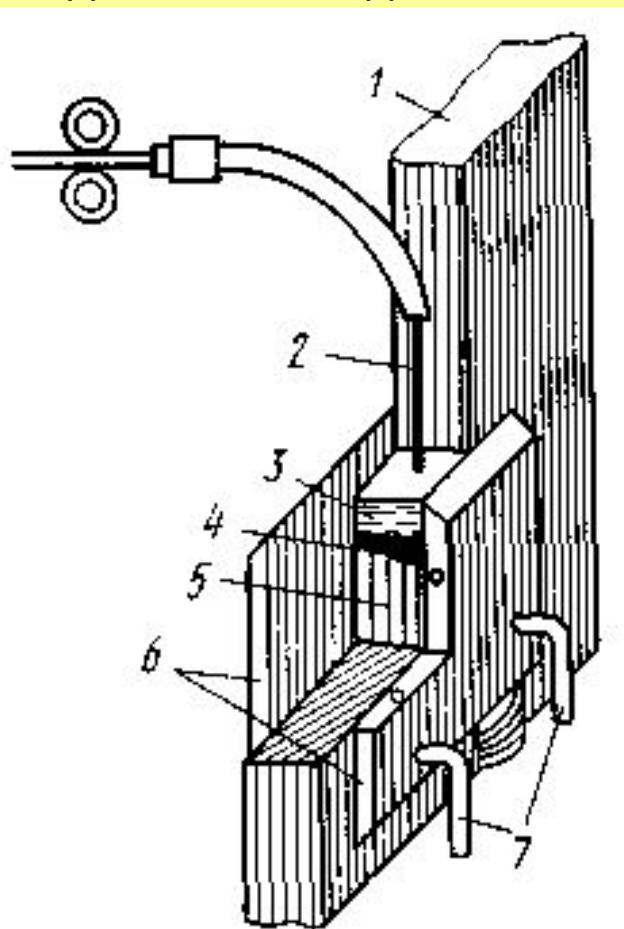


Рис. 2.4 – Электрошлаковая сварка: 1 – изделие; 2 – электрод; 3 – расплавленный шлак; 4 – расплавленный металл; 5 – сварной шов; 6 – медные ползуны; 7 – водяное охлаждение ползунов

2.2 Особые виды сварки

В промышленности и строительстве все более широкое применение получают тугоплавкие и химически активные металлы и сплавы. Они применяются в особо ответственных узлах арматуры и различных конструкций (балок, резервуаров, турбин и др.). Для получения высококачественных сварных швов применяют источники с высокой концентрацией теплоты и осуществляют сварку в среде с очень низким содержанием кислорода, азота и водорода.

Наиболее часто применяются следующие виды сварки.

Электронно-лучевая сварка (рис. 2.5)

осуществляется путем использования кинетической энергии концентрированного потока электронов, движущихся с большой скоростью в вакууме. Высокий вакуум $13 \cdot (10^{-3} \dots 10^{-5})$ Па в сварочной камере значительно снижает потери кинетической энергии электронов и обеспечивает химическую и тепловую защиту катода и свариваемого изделия. Раскаленный вольфрамовый катод 1, размещенный в фокусирующей головке 2, излучает поток электронов. Под действием высокого напряжения (30...100) кВ между катодом и ускоряющим электродом (анодом) 3 поток электронов приобретает значительную кинетическую энергию. Магнитной линзой 4 поток электронов фокусируется в узкий луч, который с помощью магнитной отклоняющей системы 5 направляется точно на свариваемые кромки изделия 6. Питание установки осуществляется высоковольтным источником постоянного тока 7.

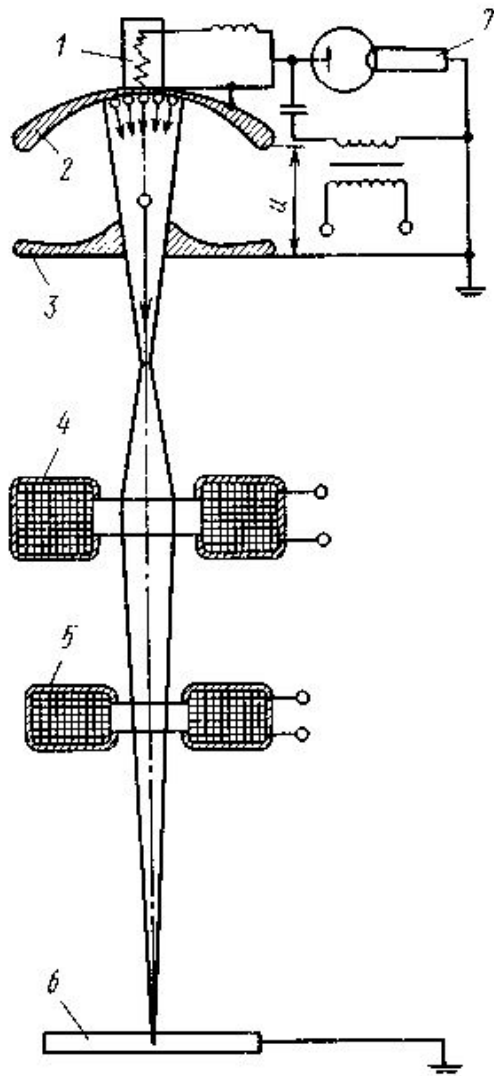


Рис.2.5 – Схема электронно-лучевой сварки: 1 – вольфрамовый катод; 2 – фокусирующая головка; 3 – ускоряющий электрод (анод); 4 – магнитная линза; 5 – магнитная отклоняющая система; 6 – свариваемое изделие

Плазменная сварка (рис. 2.6) основана на использовании струи ионизированного газа — плазмы, содержащего электрически заряженные частицы и способного проводить ток. Различают плазменную струю прямого (рис. 2.6, а) и косвенного (рис. 2.6, б) действия. Плазмообразующий газ (аргон, азот, водород) 1, подаваемый в канал 3 сопла 4 плазмотрона, сжимает столб дуги, горящей между вольфрамовым электродом 2 и свариваемым изделием 5. Происходит значительное повышение температуры столба дуги и ионизация плазмообразующего газа.

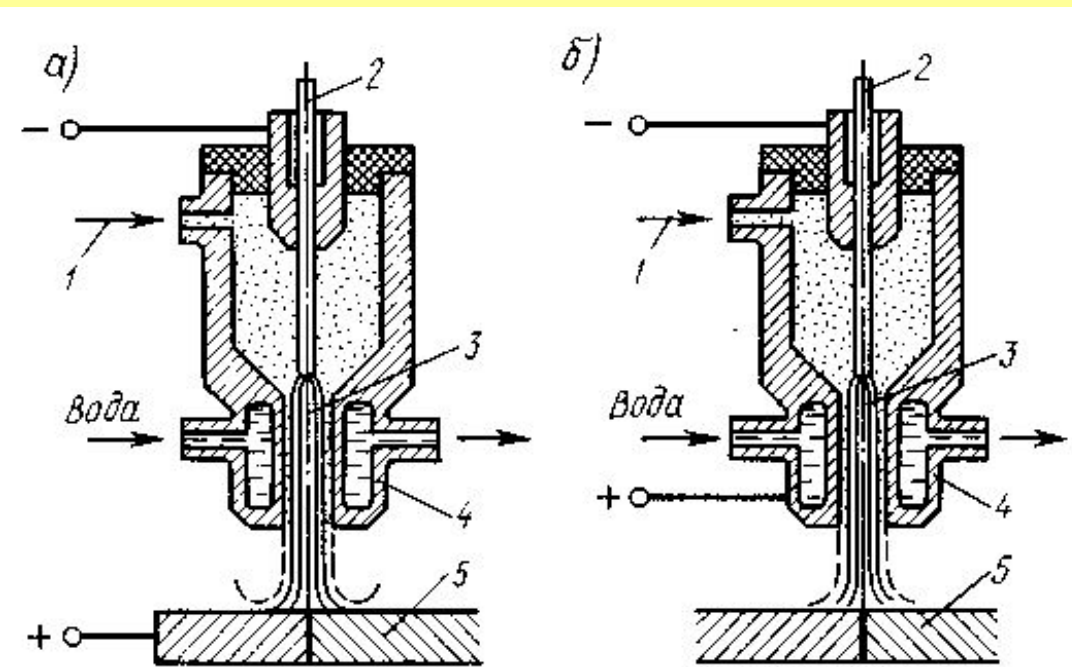


Рис. 2.6 – Схема плазменной сварки: 1 – плазмообразующий газ; 2 – вольфрамовый электрод (катод); 3 – канал плазмотрона; 4 – сопло плазмотрона; 5 – свариваемое изделие

Струей нагретого до $(10...30) \cdot 10^3$ °С и ионизированного газа – плазмы - сваривают самые различные тугоплавкие сплавы, металлы и неметаллические материалы, в том числе и неэлектропроводные (рис. 6, б). Энергия дуговой плазменной струи зависит от сварочного тока, напряжения, расхода газа, скорости сварки и других параметров. Источники питания дуги должны иметь рабочее напряжение более 120 В. Плазмообразующий газ служит также защитой расплавленного металла от атмосферного воздуха. Иногда для защиты расплавленного металла подают отдельную струю более дешевого газа, который, имея более низкую температуру, одновременно охлаждает сопло плазмотрона. В некоторых типах плазмотронов применяют водяное охлаждение.

2.3 Электрическая сварочная дуга

2.3.1 Основные понятия.

Электрическая сварочная дуга представляет собой устойчивый длительный электрический разряд в газовой среде между твердыми или жидкими электродами, осуществляемый при высокой плотности тока и сопровождаемый выделением большого количества теплоты. Электрический разряд в газе — это электрический ток, проходящий через газовую среду благодаря наличию в ней свободных электронов, а также отрицательных и положительных ионов, способных перемещаться между электродами под действием приложенного электрического поля (разности потенциалов между электродами).

Электрон — это частица весьма малой массы, несущая элементарный (наименьший, неделимый) электрический заряд отрицательного знака. Масса электрона — $9,1 \cdot 10^{-28}$ г; элементарный электрический заряд равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Ионом называется атом или молекула вещества, имеющая один или несколько элементарных зарядов. Положительные ионы имеют избыточный положительный заряд; они образуются при потере нейтральным атомом или молекулой одного или нескольких электронов из своей наружной (валентной) оболочки (электроны, вращающиеся в валентной оболочке атома, связаны слабее, чем электроны внутренних оболочек, и поэтому легко отрываются от атома при столкновениях или под действием облучения). Отрицательные ионы имеют избыточный отрицательный заряд; они образуются, если атом или молекула присоединяет к своей валентной оболочке один или несколько лишних электронов.

Ионизация – это процесс, при котором из нейтральных атомов и молекул образуются положительные и отрицательные ионы.

В виду того, что в металлах имеется большая концентрация свободных электронов, то можно извлечь эти электроны из объема металла в газовую среду и затем использовать для ионизации молекул газа. Существует несколько способов извлечения электронов из металлов. Из них для процесса сварки имеют значения два способа: термоэлектронная и автоэлектронная эмиссии.

При *термоэлектронной эмиссии* происходит «испарение» свободных электронов с поверхности металла благодаря высокой температуре. Чем выше температура металла, тем большее число свободных электронов приобретают энергии, достаточные для преодоления «потенциального барьера» в поверхностном слое и выхода из металла.

При *автоэлектронной эмиссии* извлечение электронов из металла производится при помощи внешнего электрического поля, которое несколько изменяет потенциальный барьер у поверхности металла и облегчает выход тех электронов, которые внутри металла имеют достаточно большую энергию и могут преодолеть этот барьер.

Ионизацию, вызванную в некотором объеме газовой среды, примято называть *объемной ионизацией*. Объемная ионизация, полученная благодаря нагреванию газа до очень высоких температур, называется *термической ионизацией*. При высоких температурах значительная часть молекул газа обладает достаточной энергией для того, чтобы при столкновениях могло произойти разбиение нейтральных молекул на ионы. Кроме того, с повышением температуры увеличивается общее число столкновений между молекулами газа. При очень высоких температурах в процессе ионизации начинает также играть заметную роль излучение газа и раскаленных электродов.

Ионизация газовой среды характеризуется степенью ионизации, т. е. отношением числа заряженных частиц в данном объеме к первоначальному числу частиц (до начала ионизации).

При полной ионизации степень ионизации будет равна единице. На рис. 2.7 представлен график зависимости степени ионизации от температуры нагрева некоторых элементов. Из графика видно, что при температуре 6000...8000 К такие вещества, как калий, натрий, кальций, обладают достаточно высокой степенью ионизации. Пары этих элементов, находясь в дуговом промежутке, обеспечивают легкость возбуждения и устойчивое горение дуги. Это свойство щелочных металлов объясняется тем, что атомы этих металлов обладают малым потенциалом ионизации. Потенциалом ионизации U (В) называется отношение работы W (Дж), которая необходима для удаления одного электрона из атома вещества, к заряду этого электрона q (Кл), т.е. $U = W/q$.

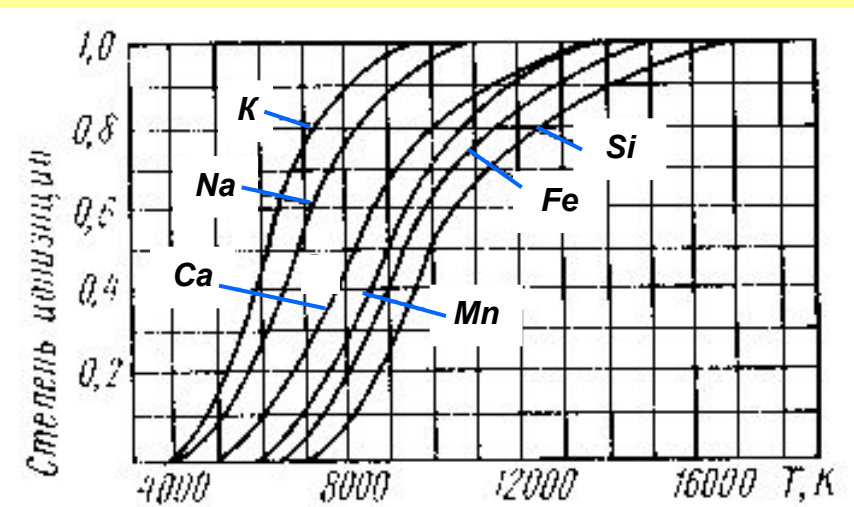


Рис. 2.7 – Зависимость степени ионизации некоторых металлов в зависимости от температуры

Сложные атомы, содержащие в своем составе много электронов, имеют несколько потенциалов ионизации. Первый потенциал ионизации соответствует удалению из атома электрона, который находится в наружной оболочке атома и слабее других связан с ним. Удаление следующих электронов, расположенных ближе к ядру и сильнее связанных с ним, потребует большей работы. Поэтому вторые и последующие потенциалы ионизации, соответствующие удалению второго и последующих электронов, будут больше. Первые потенциалы ионизации некоторых элементов имеют следующие значения:

Элементы	K	Na	Ba	Li	Al	Ca	Cr	Mn	C	H	O	N
$U_1, В$	4,32	5,12	5,19	5,37	5,96	6,08	6,74	7,40	11,22	13,53	13,56	14,51

Как видно, наименьшими потенциалами ионизации обладают калий, натрий, барий, литий, алюминий, кальций и др. Поэтому для повышения устойчивости горения электрической дуги эти вещества вводят в зону дуги в виде электродных покрытий или флюсов.

Таким образом, электропроводность воздушного промежутка между электродами, а отсюда и устойчивое горение дуги обеспечиваются эмиссией катода и объемной ионизацией газов в зоне дуги, благодаря которым в дуге перемещаются мощные потоки заряженных частиц.

Электрическая дуга постоянного тока возбуждается при соприкосновении торца электрода и кромок свариваемой детали. Контакт в начальный момент осуществляется между микровыступами поверхностей электрода и свариваемой детали (рис. 2.8, а). Высокая плотность тока способствует мгновенному расплавлению этих выступов и образованию пленки жидкого металла (рис. 2.8, б), которая замыкает сварочную цепь на участке «электрод — свариваемая деталь». При последующем отводе электрода от поверхности детали на 2...4 мм (рис. 2.8, в) пленка жидкого металла растягивается, а сечение уменьшается, вследствие чего возрастает плотность тока и повышается температура металла. Эти явления приводят к разрыву пленки и испарению вскипевшего металла. Возникшие при высокой температуре интенсивные термоэлектронная и автоэлектронная эмиссии обеспечивают ионизацию паров металла и газов межэлектродного промежутка.

В образовавшейся ионизированной среде возникает электрическая сварочная дуга (рис. 8, г). Процесс возбуждения дуги кратковременен и осуществляется сварщиком в течение долей секунды. В установившейся сварочной дуге различают три зоны: катодную 1, анодную 3 и столба дуги 2.

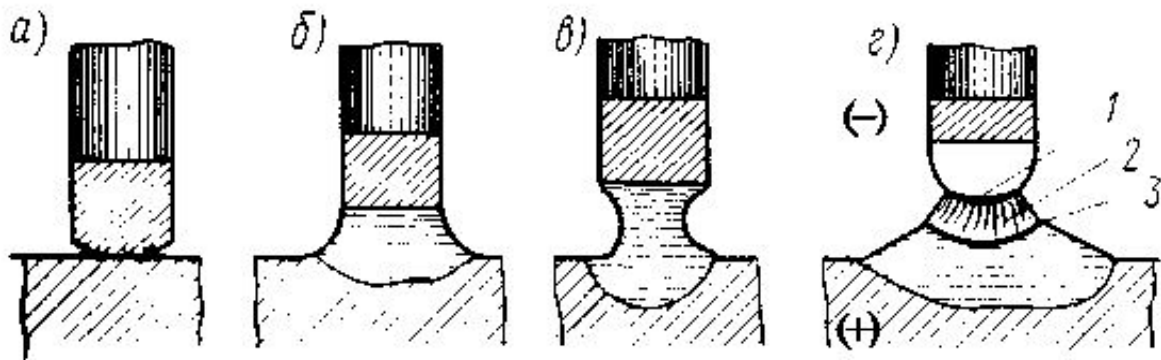
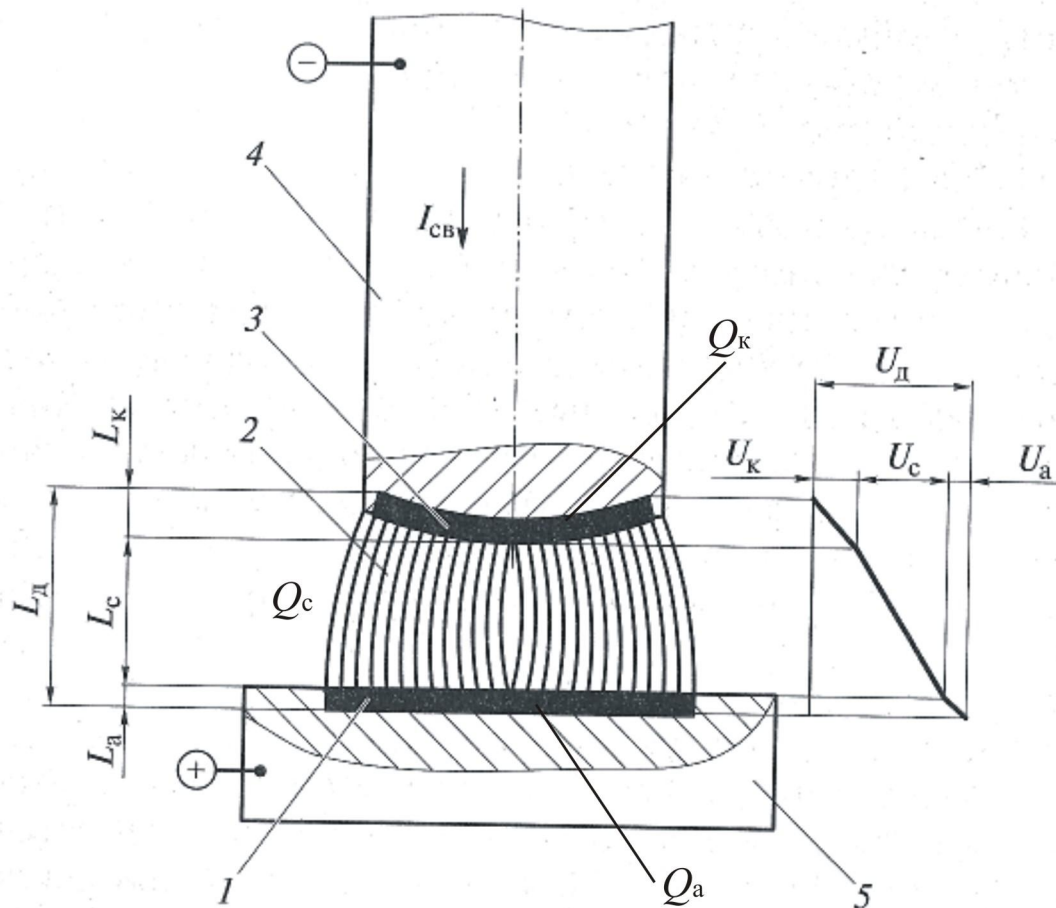


Рис. 2.8 – Схема образования электрической дуги: 1 – катодная зона; 2 – столб дуги; 3 – анодная зона 29



Участки электрической дуги:

1 - анодное пятно; 2 - дуга; 3 - катодное пятно; 4 - катод;
 5 - анод; $I_{св}$ - сила сварочного тока; L_d - длина дуги;
 L_a - протяженность анодной области; L_c - длина столба дуги; L_k - протяженность катодной области; U_d - падение напряжения на дуге; U_a , U_k , U_c - падение напряжения в анодной, катодной областях и столбе дуги;
 Q_a , Q_k , Q_c - тепло выделяемое дугой на аноде, катоде и столбе дуги

Катодная зона длиной около 10^{-5} см начинается с раскаленного торца катода, на котором расположено так называемое катодное пятно. Отсюда вылетает поток свободных электронов, осуществляющих ионизацию дугового промежутка. Плотность тока на катодном пятне достигает $60...70 \text{ А/мм}^2$. К катоду устремляются потоки положительных ионов, которые бомбардируют и отдают ему свою энергию, вызывая нагрев до температуры $2500...3000 \text{ }^\circ\text{С}$. *Анодная зона* расположена у торца положительного электрода, в котором выделяется небольшой участок, называемый анодным пятном. К анодному пятну устремляются и отдают свою энергию потоки электронов, накаляя его до температуры $2500... 4000 \text{ }^\circ\text{С}$. *Столб дуги*, расположенный между катодной и анодной зонами, состоит из раскаленных и ионизированных частиц. Температура в этой зоне достигает $6000...7000 \text{ }^\circ\text{С}$ в зависимости от плотности сварочного тока.

Для возбуждения дуги в начальный момент необходимо несколько большее напряжение, чем при ее последующем горении. Это объясняется тем, что при возбуждении дуги воздушный зазор недостаточно нагрет, степень ионизации недостаточно высокая и необходимо большее напряжение, способное сообщить свободным электронам достаточно большую энергию, чтобы при их столкновении с атомами газового промежутка могла произойти ионизация. Увеличение концентрации свободных электронов в объеме дуги приводит к интенсивной ионизации дугового промежутка, а отсюда к повышению его электропроводности. Вследствие этого напряжение тока падает до значения, которое необходимо для устойчивого горения дуги.

Зависимость напряжения дуги от тока в сварочной цепи называют статической вольт-амперной характеристикой дуги.

Вольт-амперная характеристика дуги (рис. 2.9, а) имеет три области: падающую 1, жесткую 2 и возрастающую 3. В области 1 (до 100 А) с увеличением тока напряжение значительно уменьшается. Это происходит в связи с тем, что при повышении тока увеличивается поперечное сечение, а следовательно, и проводимость столба дуги. В области 2 (100...1000 А) при увеличении тока напряжение сохраняется постоянным, так как сечение столба дуги и площади анодного и катодного пятен увеличиваются пропорционально току. Область характеризуется постоянством плотности тока. В области 3 увеличение тока вызывает возрастание напряжения вследствие того, что увеличение плотности тока выше определенного значения не сопровождается увеличением катодного пятна ввиду ограниченности сечения электрода. Дуга области 1 горит неустойчиво и поэтому имеет ограниченное применение. Дуга области 2 горит устойчиво и обеспечивает нормальный процесс сварки.

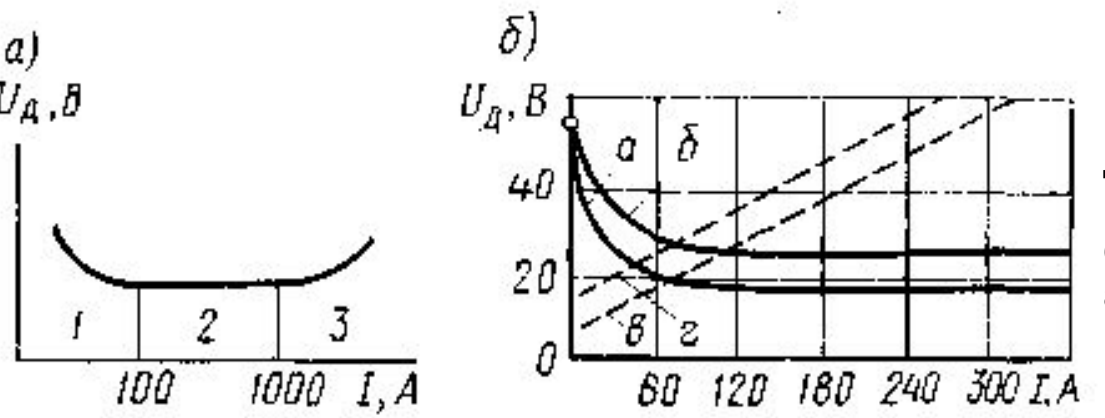
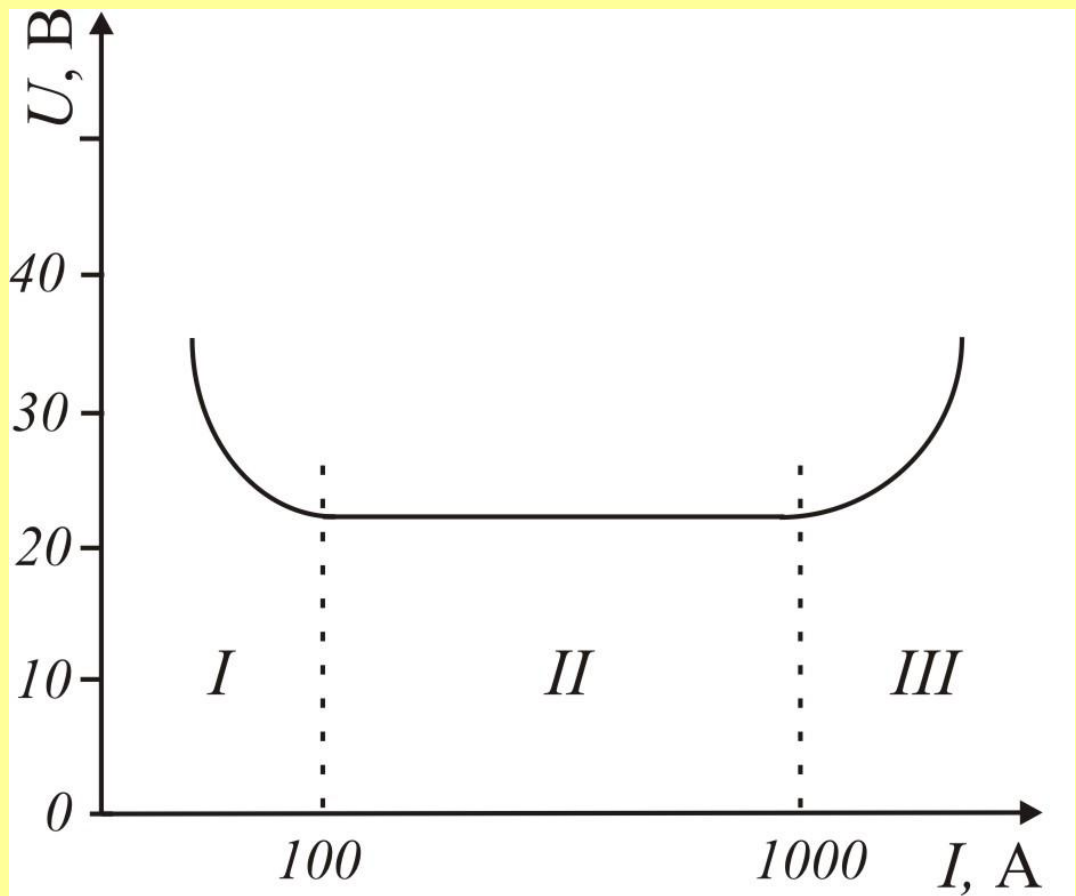


Рис. 2.9 – Вольт-амперная характеристика дуги (а) и при дуговой сварки низкоуглеродистой стали (б): а – ручная сварка длина дуги 2 мм; б – 4 мм; в, г – автоматическая сварка под флюсом при высоких плотностях тока



Вольт-амперная характеристика дуги

Напряжение, необходимое для возбуждения дуги, зависит: от рода тока (постоянный или переменный); дугового промежутка; материала электрода и свариваемых кромок; покрытия электродов и ряда других факторов. Значения напряжений, обеспечивающих возникновение дуги в дуговых промежутках, равных 2...4 мм, находятся в пределах 40...70 В. Напряжение для установившейся сварочной дуги может быть определено по формуле

$$U_{\text{д}} = a + b \cdot l_{\text{д}}$$

где a — коэффициент, по своей физической сущности составляющий сумму падений напряжений в зонах катода и анода, В; b — коэффициент, выражающий среднее падение напряжения на единицу длины дуги, В/мм; $l_{\text{д}}$ - длина дуги, мм.

Длиной дуги называется расстояние между торцом электрода и поверхностью сварочной ванны. *Короткой дугой* называют дугу длиной 2...4 мм. Длина *нормальной дуги* составляет 4...6 мм. Дугу длиной более 6 мм называют *длинной*.

Оптимальный режим сварки обеспечивается при короткой дуге. При длинной дуге процесс протекает неравномерно, дуга горит неустойчиво; металл, проходя через дуговой промежуток, больше окисляется и азотируется, увеличивается угар и разбрызгивание металла.

Электрическая сварочная дуга может быть отклонена от своего нормального положения при помощи магнитных полей, создаваемых вокруг дуги и в свариваемой детали. Эти поля действуют на движущиеся заряженные частицы и тем самым оказывают воздействие на всю дугу. Такое явление называют *магнитным дутьем*. Воздействие магнитных полей на дугу прямо пропорционально квадрату силы тока и достигает заметного значения при сварочных токах более 300 А.

Магнитные поля оказывают отклоняющее действие на дугу при неравномерном и несимметричном расположении поля относительно дуги. На *рис. 2.10* показаны влияния места подвода тока к свариваемой детали и наклона электрода на отклонение дуги. Наличие вблизи сварочной дуги значительных ферромагнитных масс нарушает симметричность магнитного поля дуги и вызывает отклонение дуги в сторону этих масс.

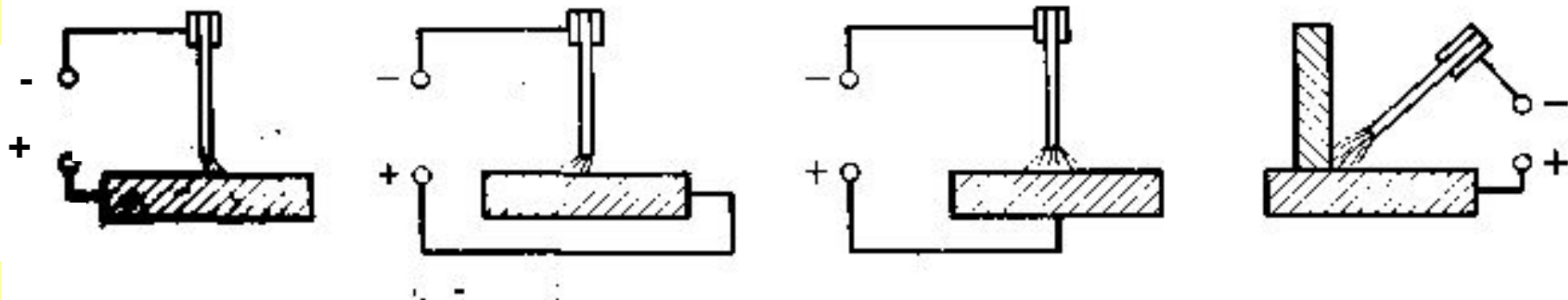
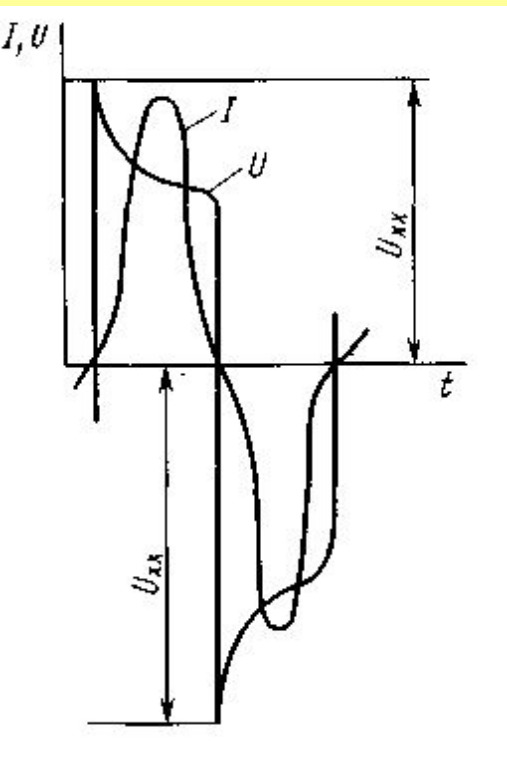


Рис. 2.10 – Влияние места подвода тока к свариваемой детали и наклона электрода на отклонение дуги

Магнитное дутье в некоторых случаях затрудняет процесс сварки, и поэтому принимаются меры по снижению его действия на дугу. К таким мерам относятся: сварка короткой дугой; подвод сварочного тока в точку, максимально близкой к дуге; наклон электрода в сторону действия магнитного дутья; размещение у места сварки ферромагнитных масс.

При использовании переменного тока анодное и катодное пятна меняются местами с частотой, равной частоте тока. С течением времени напряжение U и ток I периодически изменяются от нулевого значения до наибольшего, как показано на **рис. 2.11** (U_{xx} — напряжение зажигания дуги). При переходе значения тока через нуль и перемене полярности в начале и в конце каждого полупериода дуга гаснет, температура активных пятен и дугового промежутка снижается. Вследствие этого происходит деионизация газов и уменьшение электропроводности столба дуги. Интенсивнее падает температура активного пятна, расположенного на поверхности сварочной ванны в связи с отводом теплоты в массу основного металла. Повторное зажигание дуги в начале каждого полупериода возможно только при повышенном напряжении, называемом пиком зажигания. При этом установлено, что пик зажигания несколько выше, когда катодное пятно находится на основном металле. Для снижения пика зажигания, облегчения повторного зажигания дуги и повышения устойчивости ее горения применяют меры, снижающие эффективный потенциал ионизации газов в дуге. При этом электропроводность дуги после угасания дуги сохраняется дольше, пик зажигания снижается, дуга легче возбуждается и горит устойчивее.



К этим мерам относится применение различных стабилизирующих элементов (калий, натрий, кальций и др.), вводимых в зону дуги в виде электродных покрытий или в виде флюсов.

Важное значение имеет сдвиг фаз между напряжением и током: необходимо, чтобы при переходе тока через нулевое значение напряжение было достаточным для возбуждения дуги.

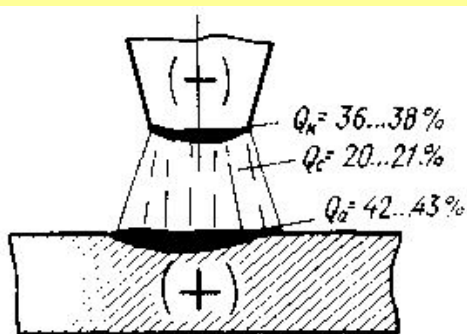
Рис. 2.11 – Зависимость изменения токовых характеристик при использовании переменного тока от времени

2.4 Тепловые свойства сварочной дуги.

Энергия мощных потоков заряженных частиц, бомбардирующих катод и анод, превращается в тепловую энергию электрической дуги. Суммарное количество теплоты Q (Дж), выделяемое дугой на катоде Q_k , аноде Q_a и столбе дуги Q_c , определяется по формуле

$$Q = IU_{д} \cdot t,$$

где I – сварочный ток, А; $U_{д}$ – напряжение дуги, В; t – время горения дуги, с.



При питании дуги постоянным током (рис. 2.12) наибольшее количество теплоты выделяется в зоне анода (42...43%). Это объясняется тем, что анод подвергается более мощной бомбардировке заряженными частицами, чем катод, а при столкновении частиц в столбе дуги выделяется меньшая доля общего количества теплоты.

При сварке угольным электродом температура в катодной зоне достигает 3200 °С, в анодной — 3900 °С, а в столбе дуги среднее значение температуры составляет 6000 °С.

При сварке металлическим электродом температура катодной зоны составляет около 2400 °С, а анодной зоны — 2600 °С.

Разная температура катодной и анодной зон, а также и разное количество теплоты, выделяющееся в этих зонах, используются при решении технологических задач. При сварке деталей, требующих большого подвода теплоты для прогрева кромок, применяют так называемую прямую полярность, при которой анод (плюсовая клемма источника тока) подсоединяют к детали, а катод (минусовая клемма источника тока) — к электроду. При сварке тонкостенных изделий, тонколистовых конструкций, а также сталей, не допускающих перегрева (нержавеющие, жаропрочные, высокоуглеродистые и др.), применяют сварку постоянным током обратной полярности. В этом случае катод подсоединяют к свариваемой детали, а анод — к электроду.

При этом не только обеспечивается относительно меньший нагрев свариваемой детали, но и ускоряется процесс расплавления электродного материала за счет более высокой температуры анодной зоны и большего подвода теплоты. Полярность клемм источника постоянного тока может быть определена с помощью раствора поваренной соли (половина чайной ложки соли на стакан воды). Если в такой раствор опустить провода от клемм источника тока, то у отрицательного провода будет происходить бурное выделение пузырьков водорода.

При питании дуги переменным током различие температур катодной и анодной зон и распределение теплоты сглаживаются вследствие периодической смены катодного и анодного пятен с частотой, равной частоте тока.

Практика показывает, что в среднем при ручной сварке только 60...70 % теплоты дуги используется на нагревание и плавление металла. Остальная часть теплоты рассеивается в окружающую среду через излучение и конвекцию.

Количество теплоты, используемое на нагрев и плавку свариваемого металла в единицу времени, называется *эффективной тепловой мощностью дуги* Q_3 , (Дж). Она равна полной тепловой мощности дуги, умноженной на эффективный коэффициент полезного действия η нагрева металла дугой:

$$Q_3 = I \cdot U \cdot \eta.$$

Коэффициент η зависит от способа сварки, материала электрода, состава электродного покрытия и других факторов. При ручной дуговой сварке электродом с тонким покрытием или угольным электродом η составляет 0,5...0,6; а при качественных электродах — 0,7...0,85. При аргонодуговой сварке потери теплоты значительны и составляют 0,5...0,6. Наиболее полно используется теплота при сварке под флюсом ($\eta = 0,85...0,93$).

Для характеристики теплового режима процесса сварки принято определять погонную энергию дуги, т. е. количество теплоты, вводимое в металл на единицу длины однопроходного шва, измеряемое в Дж/м. Погонная энергия $Q_{\text{п}}$, равна отношению эффективной тепловой мощности $Q_{\text{э}}$, к скорости сварки v :

$$Q_{\text{п}} = I \cdot U \cdot \eta / v.$$

Потери теплоты при *ручной дуговой сварке* составляют примерно 25 %, из которых 20 % уходят в окружающую среду дуги через излучение и конвекцию паров и газов, а остальные 5 % — на угар и разбрызгивание свариваемого металла. Потери теплоты при *автоматической сварке под флюсом* составляют только 17 %, из которых 16 % расходуются на плавление флюса, а на угар и разбрызгивание затрачивается около 1 % выделяемой дугой теплоты.

Спасибо за внимание!