

Министерство образования и науки Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Е.В. ХАРЛАМОВА

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ

Утверждено
Редакционно-издательским советом университета
в качестве конспекта лекций

НОВОСИБИРСК
2006

УДК 621.791.9 (075.8)
X 211

Рецензенты: д-р техн. наук, проф., *А.С. Аньшаков*
д-р техн. наук, проф., *А.И. Алиферов*

Работа выполнена на кафедре
автоматизированных электротехнологических установок
для студентов ЭМФ дневного и заочного отделений
(специальности 150202 «Оборудование и технология сварочного
производства» и специализации
«Электросварочные установки и системы»)

Харламова, Е. В.

Технологические основы сварки плавлением : конспект лекций / Е.В. Харламова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 44 с.

В работе описаны основные способы сварки плавлением, процессы, протекающие при формировании сварных соединений. Рассмотрены сущность и техника при различных способах сварки плавлением. Описаны сварочные материалы, их область применения, приведена маркировка. Даны рекомендации по выбору режимов сварки.

УДК

© Новосибирский государственный
технический университет, 2006

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Основные понятия и определения	6
1.1. Классификация видов дуговой сварки плавлением	7
1.2. Схемы процессов	10
2. Классификация сварных соединений и швов.....	15
2.1. Конструктивные элементы сварных соединений при дуговой и электрошлаковой сварке	19
2.2. Конструктивные элементы сварных соединений при плазменной, электронно-лучевой и лазерной сварке	23
3. Сварочная дуга и ее свойства.....	24
3.1. Столб дуги	25
3.2. Анодная область	27
3.3. Общие характеристики сварочной дуги	28
3.4. Виды сварочных дуг.....	29
3.5. Зажигание и развитие сварочной дуги.....	31
4. Сварочные материалы.....	32
Список литературы	43

ВВЕДЕНИЕ

Впервые мысль о возможности практического применения «электрических искр» для плавления металлов высказал в 1753 г. академик Российской академии наук Г.Р. Рихман, выполнивший ряд исследований атмосферного электричества. В подтверждение этой идеи итальянский ученый А. Вольта создал гальванический элемент (вольтов столб).

В 1802 г. профессор Санкт-Петербургской военно-хирургической академии В.В. Петров, используя мощный гальванический элемент, открыл явление электрической дуги и указал области ее практического применения. Независимо от В.В. Петрова, но несколько позже (1809 г.) электрическую дугу получил английский физик Г. Деви.

Для практической реализации электрической сварки металлов потребовались многие годы совместной работы физиков и техников, направленной на создание электрических генераторов. Важную роль сыграли открытия и изобретения в области магнетизма и электричества.

Первые электромагнитные генераторы были созданы в 70-х гг. XIX в.

В 1849 г. американец К. Стэт получил английский патент на соединение металлов с помощью электричества, однако он не был реализован на практике. Глубокая разработка процесса началась позже.

В 1882 г. русский изобретатель Н.Н. Бенардос предложил способ соединения и разъединения металлов непосредственно *электрическим током*.

Он практически осуществил способ сварки и резки металлов электрической дугой угольным электродом. На его счету много и других важных изобретений в области сварки (спиральношовные трубы, порошковая проволока и др.).

Дальнейшее развитие электрическая дуговая сварка получила в работах Н.Г. Славянова, в 1888 г. разработавшего способ электродуговой сварки металлическим электродом, а также им были разработаны технологические и металлургические основы электрической сварки плавления-

ем. Он применил флюс для защиты металла сварочной ванны от воздуха, предложил способ наплавки и горячей сварки чугуна, организовал первый в мире электросварочный цех. Н.Н. Бенардос и Н.Г. Славянов положили начало автоматизации сварочных процессов, создав первые устройства для механизированной подачи электрода в дугу.

Дальнейшее развитие электрической сварки несколько замедлилось в связи с конкуренцией газовой сварки кислородно-ацетиленовым пламенем.

В начале XX в. этот способ обеспечил более высокое качество сварных швов, чем дуговая сварка в гелии электродом. Положение изменилось, когда в 1907 г. шведский инженер О. Квельберг применил металлические электроды с покрытием. Это покрытие предохраняло металл шва от вредного воздействия воздуха (окисления и азотирования) и стабилизировало горение дуги. Покрытые электроды обеспечили повышение качества сварных соединений.

Ручная дуговая сварка плавящимся электродом начала широко применяться на заводах США, Англии, Австрии, Венгрии и других стран.

Отсталая промышленность дореволюционной России так и не смогла в должном объеме использовать дуговую сварку.

Уже в начале 20-х гг. под руководством В.П. Вологодина были изготовлены сварные котлы, а несколько позже – суда и другие ответственные конструкции.

В конце первой четверти XX в. ручная дуговая сварка плавящимся электродом стала основным способом сварки.

Новый этап развития механизированной дуговой сварки в нашей стране начался в конце 30-х гг., когда на основе идей, выдвинутых Н.Г. Славяновым, коллективом Института электросварки АН УССР под руководством академика Евгения Оскаровича Патона был разработан новый способ сварки – автоматическая сварка под флюсом. В середине 40-х гг. сварка под флюсом была применена и для полуавтоматического процесса.

Способ сварки под флюсом за рубежом впервые появился в США (фирма «Линде»).

В конце 40-х гг. получил промышленное применение способ дуговой сварки в защитных газах. Газ для защиты зоны сварки впервые использовал американский ученый А. Александер еще в 1928 г. Однако в те годы этот способ не нашел серьезного промышленного применения из-за сложности получения защитных газов.

Положение изменилось после того, как для защиты были использованы пригодные для массового применения газы (гелий (He) и аргон (Ar) в США и CO_2 в СССР) и различные смеси газов.

Впервые осуществил сварку неплавящимся (угольным) электродом в CO_2 Н.Г. Останенко. Затем усилиями коллективов ЦНИИТМАШа, института электросварки им. Е.О. Патона и ряда промышленных предприятий был разработан способ сварки в CO_2 плавящимся электродом.

В 1949 г. серьезным достижением отечественной сварочной техники явилась разработка ЭШС (разработана сотрудниками Института электросварки им. Е.О. Патона в сотрудничестве с работниками заводов тяжелого машиностроения).

На основе электрошлакового процесса в нашей стране создан новый способ рафинирования металла, получивший название электрошлакового переплава.

В конце 50-х гг. французскими учеными был создан новый способ сварки, получивший название *электронно-лучевого процесса*. Электронно-лучевая сварка в настоящее время находит широкое применение при соединении тугоплавких химически активных металлов и сплавов и ряда специальных сталей.

Большой вклад в развитие научных основ технологии электрической сварки металлов и сплавов плавлением внесли советские ученые: коллектив ученых института электросварки им. Е.О. Патона, МВТУ им. Н.Э. Баумана, ЦНИИТМАШа, ВНИИАВТОГЕНМАШа, Ленинградская школа сварщиков, а также многочисленные кафедры политехнических вузов страны.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Сварным соединением называется совокупность деталей и узлов, соединенных между собой сварными швами (рис. 1.1).

Сварным швом называется часть сварного соединения, которая образуется в результате затвердевания расплавленного или нагретого металла.

Кромками называются торцовые поверхности деталей, подлежащие нагреву и расплавлению. Нескошенная часть кромок называется *притуплением*, а расстояние между кромками – *зазором*.

В процессе сварки кромки расплавляются и образуется углубление, называемое *сварочной ванной*.

Металл, из которого изготавливают свариваемые детали, называется *основным металлом*.

Расплавленный основной и присадочный металл образует *металл шва*.

Толщина шва обычно несколько больше толщины основного металла. Это утолщение представляет собой *усиление шва*.

Величина, на которую расплавляется основной металл вглубь, называется *глубиной провара*.

Расстояние между крайними границами расплавленного металла называется *шириной шва*.

Отношение ширины шва к глубине провара представляет собой *коэффициент формы шва (B/H)*. При автоматической сварке под слоем флюса он может измениться от 0,5 до 10, однако оптимальное его значение 1,3...2.

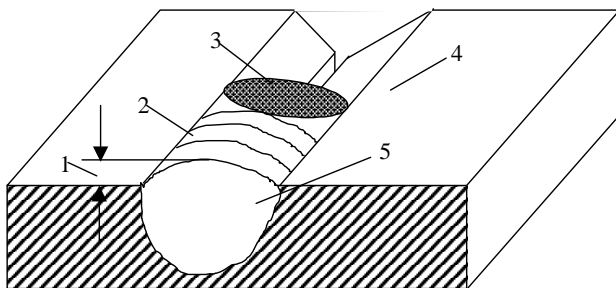


Рис. 1.1. Сварной шов: 1 – усиление шва; 2 – сварной шов; 3 – сварочная ванна; 4 – основной металл; 5 – металл шва

1.1. Классификация видов дуговой сварки плавлением

Электродуговая сварка. Необходимое для местного расплавления деталей и присадочного материала тепло образуется при горении электрической дуги между свариваемым металлом и электродом. По способу механизации сварка может быть ручная, полуавтоматическая и автоматическая. Механизированная (полуавтоматическая и автоматическая) сварка разделяется:

- а) под флюсом;
- б) в защитных газах.

Электродуговая сварка. Плавление основного металла и присадочного материала происходит за счет тепла, выделяющегося при про-

хождении электрического тока через расплавленный шлак (в период установившегося процесса).

Электронно-лучевая сварка. Сварка выполняется в камерах с разрежением до $10^{-4} \dots 10^{-6}$ мм рт. ст. Тепло выделяется за счет бомбардировки зоны сварки электронным потоком, приобретающим высокие скорости в высоковольтной установке, имеющей мощность до 50 кВт. Анодом является свариваемая деталь, а катодом – вольфрамовая нить или спираль, нагретая до температуры 2300 °С.

Газовая сварка. Основной и присадочный металл расплавляется высокотемпературным газокислородным пламенем (температура до 3200 °С).

Импульсно – дуговая сварка. Сущность способа состоит в том, что сварочный ток не сохраняет постоянную величину, а поступает в дежурную сварочную дугу определенными кратковременными импульсами.

Плазменная сварка. Плавление металла осуществляется плазменно-дуговой струей, имеющей температуру выше 3300 °С.

Лазерная сварка. Сварка основана на использовании фотоэлектронной энергии. При большом усилении световой луч способен плавить металл. Для получения такого луча применяют специальные устройства – лазеры.

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

По степени механизации различают ручную, полуавтоматическую и автоматическую сварку.

При ручной сварке операции зажигания дуги, поддержания дугового промежутка, манипуляции электродом прекращения процесса сварки выполняются вручную без применения механизмов.

При полуавтоматической сварке плавящимся электродом механизуются операции по подаче электродной проволоки в сварочную зону, а остальные операции процесса сварки осуществляются вручную.

При автоматической сварке под флюсом механизуются операции по возбуждению дуги, поддержанию определенной длины дуги, перемещению дуги вдоль линии шва.

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

По роду тока различают дуги постоянного тока (прямой или обратной полярности) и переменного тока. В зависимости от способов сварки применяют ту или иную полярность. Сварка под слоем флюса и в среде защитных газов обычно производится на обратной полярности.

По типу дуги различают дугу прямого действия (зависимую дугу) и дугу косвенного действия (независимую дугу). В первом случае дуга горит между электродом и изделием, которое также является частью сварочной цепи, и для сварки используется теплота, выделяемая в столбе дуги и на электродах.

Во втором случае дуга горит между двумя электродами. Основной металл не является частью сварочной цепи и расплавляется преимущественно за счет теплоотдачи от газов столба дуги. В этом случае питание дуги осуществляется обычно переменным током, но она имеет незначительное применение из-за малого коэффициента полезного действия дуги.

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

Если каждый электрод получает питание от независимого источника питания, то сварку называют двухдуговой (многодуговой). КПД составляет 0,7...0,9.

По условиям наблюдения за процессом горения дуги различают открытую, закрытую и полукрытую дугу. При открытой дуге визуальное наблюдение за процессом сварки производится через специальные защитные стекла – светофильтры. Открытая дуга применяется при многих способах сварки: РДС, сварка в среде защитных газов.

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

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

По роду защиты зоны сварки от окружающей среды различают следующие способы: без защиты (голым электродом, электродом со стабилизирующим покрытием), со шлаковой защитой (толстопокрывными электродами, под флюсом), газовой (в среде газов) с комбинированной защитой (газовая среда и покрытие или флюс). Стабилизирующие покрытия представляют собой материалы, содержащие элементы, легко ионизирующие сварочную дугу, наносятся тонким слоем на стержни электродов, предназначенных для РДС.

1.2. Схемы процессов

Электрическая дуговая сварка. Широкое практическое применение находит дуга прямого действия (рис. 1.2,а), горящая между свариваемым металлом и специальным стержнем – электродом.

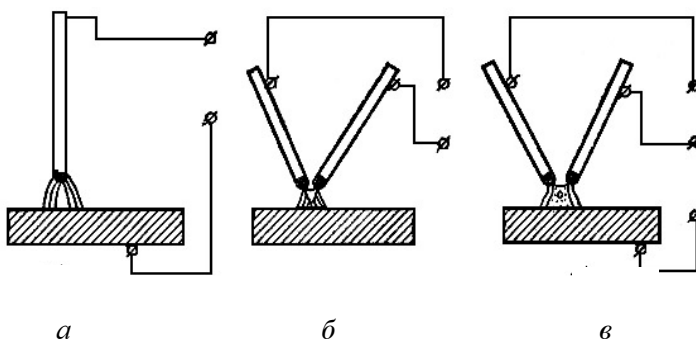


Рис. 1.2. Виды сварочных дуг: а – прямого, б – косвенного, комбинированного действия (трехфазная)

Значительно меньшее применение находит дуга косвенного действия, горящая между двумя стержнями – электродами. В этом случае для расплавления основного металла используется теплота, выделяемая при соприкосновении свариваемой поверхности со столбом (плазмой) дуги, и теплота, получаемая за счет излучения и конвекции. Сварку дугой косвенного действия можно выполнять как с присадочным металлом, так и без него. Ограниченное применение дуги косвенного действия обусловлено ее меньшей эффективностью. Возможно использование комбинированной дуги, включенной в сварочную цепь по схеме (рис. 1.2,б и в). КПД дуги прямого действия (рис. 1.3) достигает 0,3...0,4, КПД дуги косвенного действия 0,2...0,3.

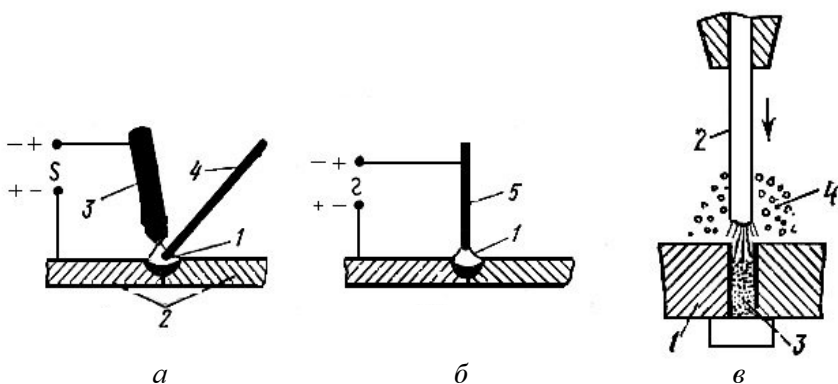


Рис. 1.3. Сварка дугой прямого действия плавящимся электродом:

а – с присадочным металлом, подаваемым в зону дуги в процессе сварки;
б – без присадочного металла; *в*) с присадочным металлом,
 вводимым между свариваемыми кромками

В зависимости от числа электродов различают сварку одним, двумя и тремя электродами, но возможно и большим числом электродов.

Сварка, при которой все электроды подсоединены к одному полюсу источника питания, называют двухэлектродной (многоэлектродной) сваркой, или сваркой сдвоенным (строеным) электродом. Если каждый из электродов получает независимое питание, процесс называют двухдуговым (многодуговым).

Сварка дугой прямого действия плавящимся электродом (рис. 1.4) является основным видом электрической сварки плавлением, КПД дуги достигает 0,7...0,9.

При сварке с газовой защитой зоны сварки (рис. 1.5) окружена газом 2, подаваемым под небольшим давлением из сопла 1, обычно расположенного концентрично электроду. Газовая защита применяется при сварке плавящимся электродом (и неплавящимся). Роль газа сводится к физической изоляции сварочной ванны от окружающего воздуха. В качестве защитной среды применяют инертные и активные газы.

Разновидностью сварки в защитных газах является сварка с контролируемой атмосферой. Сварка происходит в камере, где сначала создается вакуум, затем камера заполняется аргоном, гелием или смесью газов. При этом обеспечивается более полная защита сварочной ванны. Этот метод применяется при дуговой сварке неплавящимся электродом химически активных металлов и сплавов.

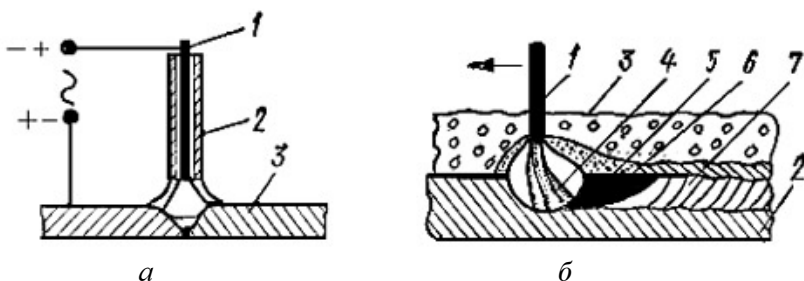


Рис.1.4. Сварка покрытым электродом (а): 1 – стержень, 2 – обмазка, 3 – основной металл; (б) автоматическая сварка под флюсом, направление сварки показано стрелкой: 1 – электродная проволока; 2 – основной металл, 3 – сварочный флюс, 4 – дуга, 5 – сварочная ванна, 6 – расплавленный флюс, 7 – расплавленный металл. Столб дуги со всех сторон окружен слоем флюса толщиной 30...50 мм

При электрошлаковом процессе основная часть энергии, расходуемая на нагрев и плавление металла, обеспечивается за счет теплоты, выделяемой в замкнутом объеме расплавленного шлака – шлаковой ванне при прохождении через нее тока (рис. 1.6).

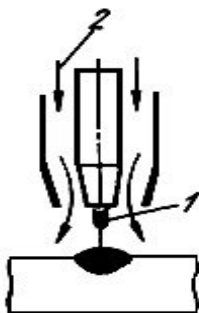


Рис. 1.5. Сварка в защитных газах

Шлаковая ванна 1 образуется путем расплавления флюса, заполняющего пространство между кромками основного металла 2 и специальными охлаждаемыми водой приспособлениями – ползунами 3, плотно прижатыми к поверхности свариваемых деталей. Флюс плавится дугой, возникающей в начальный период между основным металлом и сварочной проволокой. После расплавления определенного количества флюса дуга шунтируется расплавленным шлаком и гаснет. Длина шлаковой ванны практически равна толщине основного металла, а ширина определяется зазором между свариваемыми кромками. Глубина шлаковой ванны выбирается в зависимости от технологических условий (состава основного металла, режима сварки и т.д.).

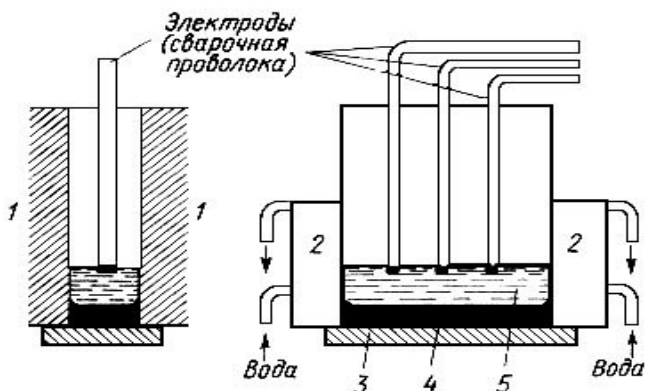


Рис. 1.6. Схема процесса электрошлаковой сварки: 1 – свариваемые кромки изделия; 2 – медные ползуны; 3 – начальные планки; 4 – расплавленный металл; 5 – жидкий шлак

Разновидностью дуговой сварки является плазменная сварка (сварка сжатой дугой). Если дуговой разряд возникает между вольфрамовым или медным электродом и основным металлом, то такая дуга называется дугой прямого действия, иногда именуемая проникающей дугой (рис. 1.7, а).

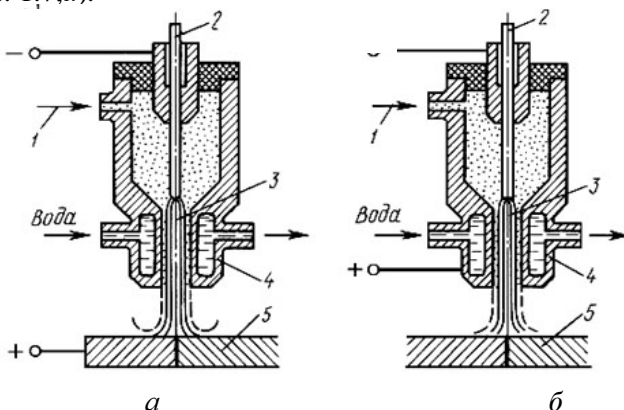


Рис. 1.7. Схема плазменной сварки:

а – дуга прямого действия; б – дуга косвенного действия; 1 – плазмообразующий газ (аргон, азот, водород); 2 – вольфрамовый или медный электрод; 3 – канал; 4 – сопло плазмотрона; 5 – свариваемое изделие

Для образования сжатой дуги вдоль ее столба через канал в сопле пропускается нейтральный одноатомный газ (аргон, гелий) или двухатомный газ (азот, водород, окись углерода или другие газы и их смеси). Газ сжимает столб дуги, что приводит к

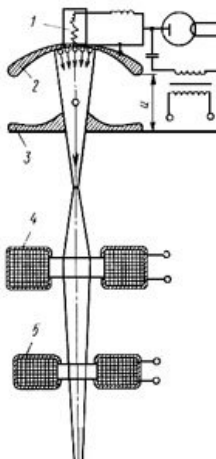


Рис. 1.8. Схема электронно-лучевой сварки

повышению его температуры до 16000°C при дуге косвенного действия и до 33000°C при дуге прямого действия, и образует так называемую холодную плазменную струю. Удельная мощность плазменной дуги более 500 кВт/см^2 . Для получения сжатой дуги служит специальный плазмотрон.

При электронно-лучевой сварке для нагрева и расплавления основного металла используется энергия, получаемая в результате интенсивной бомбардировки его быстро движущимися в вакууме электронами.

При попадании на поверхность свариваемых деталей электроны тормозятся, и происходит превращение кинетической энергии в тепловую. Раскаленный вольфрамовый катод 1 (рис.1.8), размещенный в фокусирующей головке 2, излучает поток электронов.

Под действием высокого напряжения ($30\ldots 100$) кВ между катодом и ускоряющим 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.

Установка для лазерной сварки (рис. 1.9) состоит из рабочего тела 1, лампы накачки 2, обеспечивающей световую энергию для возбуждения атомов активного вещества – излучателя. Полученное излучение фокусируется и направляется с помощью оптической системы 3 на свариваемое изделие 4.

Энергия, получаемая лазерами, невелика и составляет от сотых долей до единиц джоулей. КПД лазеров низок.

Характерной является узкая и глубокая форма проплавления основного металла. Лазерная сварка может применяться в приборостроении и в специальных случаях.

Все существующие виды сварки плавлением имеют конечную цель – получение сварных соединений, обеспечивающих необходимую несущую способность сварной конструкции, ее длительную работу в условиях эксплуатации при минимальной затрате труда и средств.

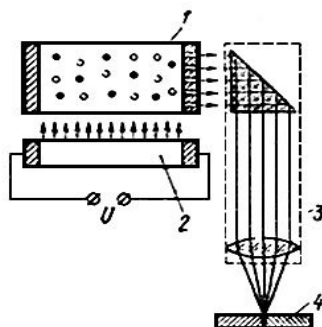


Рис. 1.9. Схема лазерной сварки

2. КЛАССИФИКАЦИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ШВОВ

Сварным соединением называют участок конструкции, в которой отдельные элементы соединены с помощью сварки. В соединении входят: сварной шов, прилегающая к нему зона основного металла со структурными и другими изменениями в результате термического действия сварки (зона термического влияния ЗТВ) и примыкающие к ней участки основного металла.

Сварной шов представляет собой закристаллизовавшийся металл, который в процессе сварки находится в расплавленном состоянии.

По форме сопряжения свариваемых элементов можно выделить следующие основные типы сварных соединений: стыковые (рис. 2.1, а), тавровые (рис. 2.1, б, в), угловые (рис. 2.1, г), нахлесточные (рис. 2.1, д).

Сварные швы подразделяются по форме поперечного сечения на стыковые (рис. 2.2, а) и угловые (рис. 2.2, б).

Разновидностью этих типов швов являются швы пробочные (рис. 2.2, в) и прорезные (рис. 2.2, г), выполняемые в нахлесточных соединениях. По форме в продольном направлении различают швы непрерывные и прерывистые.

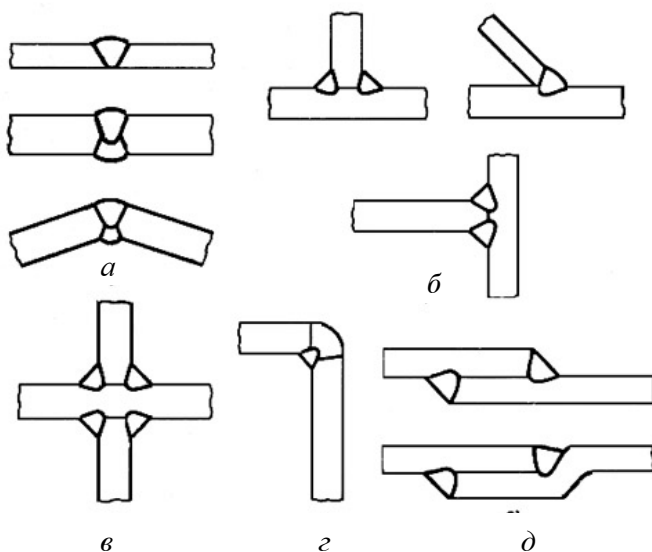


Рис. 2.1. Основные типы сварных соединений

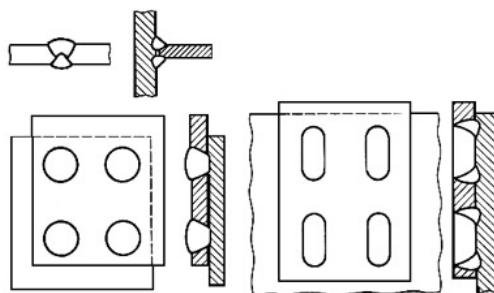


Рис. 2.2. Основные типы сварных швов

Стыковые швы выполняются, как правило, непрерывными; отличительный признак таких швов – форма разделки кромок соединяемых деталей в поперечном сечении. Поэтому признаку различают следующие основные типы стыковых швов:

- с отбортовкой кромок (рис. 2.3,а);
- без разделки кромок – односторонние и двусторонние (рис. 2.3,б);

- с разделкой одной кромки – односторонние, двусторонние с криволинейной или прямолинейной формой разделки кромки (рис. 2.3,в);
- с односторонней V-образной разделкой двух кромок (рис. 2.3,г);
- с двусторонней X-образной разделкой двух кромок (рис. 2.3,д).

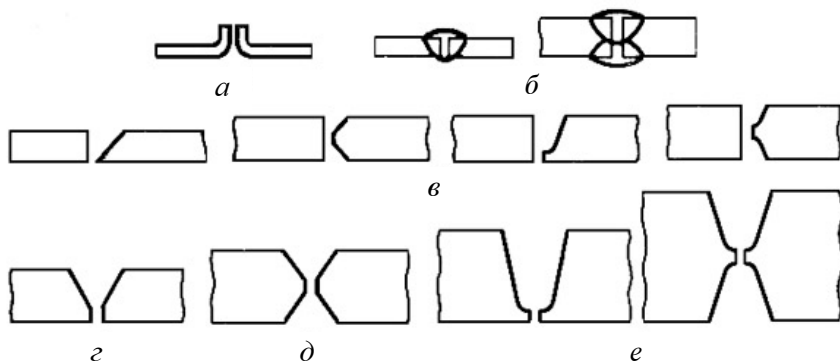


Рис. 2.3. Подготовка кромок стыковых швов

Разделка может быть образована прямыми линиями (скос кромок), либо иметь криволинейную форму (U-образную разделку, рис. 2.3,е).

Угловые швы различают по форме подготовки свариваемых кромок в поперечном сечении и сплошности шва по длине. По форме поперечного сечения швы могут быть без разделки кромок (рис. 2.4, а), с односторонней разделкой кромки (рис. 2.4,б), с двусторонней разделкой кромок (рис. 2.4,в).

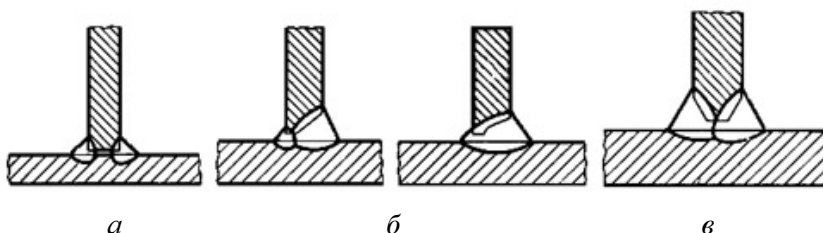


Рис. 2.4. Подготовка кромок угловых швов тавровых соединений

По протяженности угловые швы могут быть непрерывными (рис. 2.5,*а*) и прерывистыми (рис. 2.5,*з*) расположением отрезков шва.

Тавровые, нахлесточные и угловые соединения могут быть выполнены отрезками швов небольшой протяженности – точечными швами (рис. 2.5,*д*).

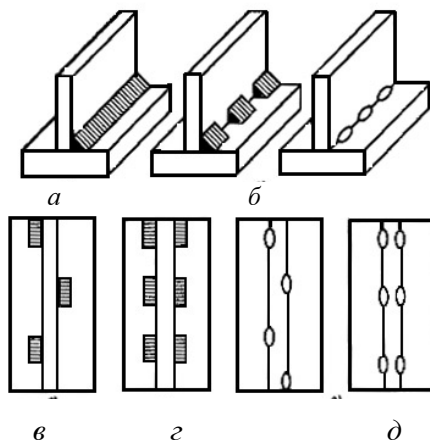


Рис. 2.5. Угловые швы тавровых соединений

Пробочные швы по своей форме в плане обычно имеют круглую форму и получаются в результате полного проплавления верхнего и частичного проплавления нижних листов (рис. 2.6,*а*) – их часто называют электрозаклепками, либо путем проплавления верхнего листа через предварительно проделанное в верхнем листе отверстие (рис. 2.6,*б*).

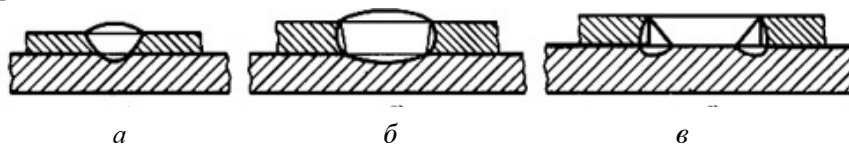


Рис. 2.6. Форма поперечного сечения пробочных и прорезных швов

Прорезные швы, обычно удлиненной формы, получаются путем приварки верхнего (накрывающего) к нижнему листу угловым швом по периметру прорези (рис. 2.6,*в*).

Форму разделки кромок и их сборку под сварку характеризуют четыре основных конструктивных элемента (рис. 2.7): зазор (b), притупление (c), угол разделки кромок (α), равный β или 2β .

Ручная дуговая сварка без разделки кромок применяется для листов толщиной до 4 мм, механизированная под флюсом – до 18 мм.

Стандартный угол разделки кромок в зависимости от способа сварки типа соединения изменяется от $60 \pm 5^\circ$ до $20 \pm 5^\circ$. Тип разделки и величина угла разделки кромок определяют количество необходимого дополнительного металла для заполнения разделки, а следовательно, производительность сварки.

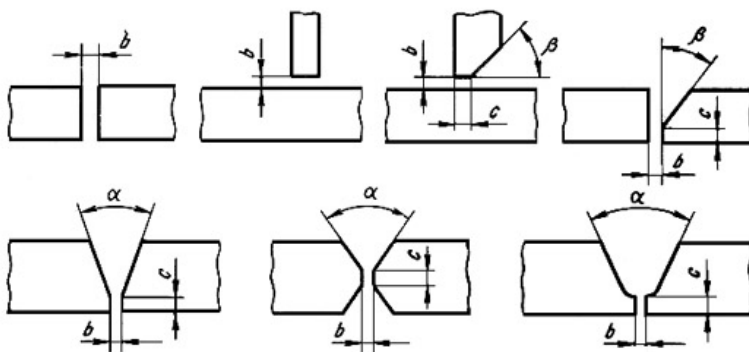


Рис.2. 7. Конструктивные элементы разделки кромок и сборки кромок под сварку

Так, например, X-образная разделка кромок по сравнению с V-образной разделкой позволяет уменьшить объем расплавленного металла в 1,6 – 1,7 раза.

Притупление (c) обычно составляет 2 ± 1 мм. Зазор (b) = 1,5... 2 мм, так как наличие зазора необходимо для провара вершины шва, но в отдельных случаях зазор может быть равным нулю или достигать 8...10 мм.

2.1. Конструктивные элементы сварных соединений при дуговой и электрошлаковой сварке

В связи с важностью правильной подготовки свариваемых кромок с точки зрения качества, экономичности, прочности и работоспособности сварного соединения созданы государственные стандарты

на подготовку кромок под сварку. Стандарты регламентируют форму и конструктивные элементы разделки и сборки кромок под сварку и размеры готовых сварных швов.

ГОСТ 5264 – 80 «Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры» регламентирует конструктивные элементы подготовки кромок и размеры выполненных швов при ручной дуговой сварке металлическим электродом во всех пространственных положениях.

ГОСТ 8710–70 «Швы сварных соединений. Автоматическая и полуавтоматическая сварка» регламентирует форму и размеры подготовки кромок и выполненных швов при дуговой механизированной (автоматической или полуавтоматической) сварке под флюсом. Дополнительно к этим стандартам выпущены стандарты, которые регламентируют конструктивные элементы сварных соединений при механизированной сварке под флюсом (ГОСТ 11533–75) и при ручной дуговой сварке (ГОСТ 11534–75) для соединений элементов под острым и тупым углами.

ГОСТ 15164–78 «Сварные соединения и швы. Электрошлаковая сварка» регламентирует форму и размеры подготовки кромок и выполненных швов при электрошлаковой сварке.

ГОСТ 14771–85 «Швы сварных соединений. Электродуговая сварка в защитных газах» регламентирует форму и размеры подготовки кромок и сварных швов при сварке сталей в защитных газах: активных (CO_2), инертных (Ar, He) и смесях газов.

ГОСТ 16098–70 «Швы сварных соединений из двухслойной коррозионно-стойкой стали» регламентирует форму и размеры подготовки кромок и выполненных сварных швов сварных соединений из двухслойной коррозионно-стойких сталей при электродуговой и электрошлаковой сварке.

ГОСТ 16037–70 «Швы сварных соединений стальных трубопроводов» регламентирует форму и размеры подготовки кромок и выполненных сварных швов стальных трубопроводов при ручной и механизированной сварке в защитных газах или под флюсом.

ГОСТ 2.312–72 «Условные изображения и обозначения швов сварных соединений» является также обязательным для применения на чертежах конструкций.

При ручной дуговой сварке такие факторы, как величина сварочного тока, скорость сварки и напряжение дуги изменяются в небольших пределах.

При механизированной сварке под флюсом глубина проплавления основного металла в определенных пределах не зависит от формы подготовки кромок и величины зазора, что объясняется высокой плотностью тока и концентрированностью теплового действия дуги при этом способе сварки.

За два прохода (по одному с каждой стороны) можно сваривать встык без разделки кромок листы $\delta = 60$ мм. Однако в этих случаях при обычном зазоре швы получаются дефектными по двум причинам:

1) количество наплавленного металла настолько велико, что внешняя часть шва оказывается чрезмерно большой и уродливой формы;

2) шов получается настолько узким, что при быстром остывании, характерном для сварки, в средней части шва возникают усадочные трещины.

Согласно ГОСТ 8713–70 без скоса кромок можно сваривать встык листы толщиной до 20 мм, при больших толщинах требуется разделка кромок. При разделке с прямолинейным скосом кромок угол разделки $25...26^\circ$, $c = 2...6$ мм, зазор $b = 0 + 1$ мм.

При толщине листов $\delta = 60$ мм скос кромок прямолинейный; для $\delta = 160$ мм предусмотрен криволинейный скос кромок с углом разделки $25...26^\circ$, так как требуется меньший объем наплавленного металла и уменьшаются угловые деформации.

Сварка тавровых соединений без скоса кромок возможна для металла толщиной до 40 мм. В зависимости от требований к прочности соединений, связанных со сквозным проваром, предусмотрены соединения с односторонним несимметричным скосом кромок для $\delta = 8...30$ мм и двусторонним симметричным для толщины $30...60$ мм.

Форма подготовки кромок при ЭШС по ГОСТ 15164–78, показана на рис. 2.8.

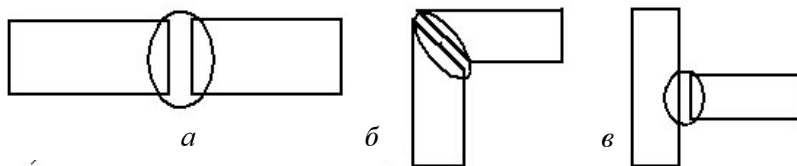


Рис.2.8. Форма подготовки кромок для ЭШС:
а – стыкового; *б* – углового; *в* – таврового соединений

В стандарте регламентированы толщины минимальные (не менее 16 мм) и наибольшие (до 800 мм), а также зазоры величиной 16...26 мм.

ГОСТ 14771–85 обычно руководствуются при сварке проволокой диаметром от 1,6 мм и выше. Стандарт предусматривает сварку металла до $\delta = 120$ мм (в CO_2) с разделкой кромок металла толщиной свыше 10 мм. При этом уменьшены углы разделки до 40° и величина притупления до 1...2 мм при зазорах в пределах 0...3 мм.

При сварке в инертных газах плавящимся электродом сохраняются те же особенности, что и при сварке неплавящимся электродом ($\delta = 20$ мм), но предусмотрена сварка металла толщиной до 100 мм.

Обычно выбирают такие типы разделок, при которых обеспечиваются наименьшие объем и стоимость работ по разделке кромок, объем и масса наплавленного металла, полный провар по толщине, плавная форма сопряжения внешней части шва и минимальные угловые деформации.

Для толстолистового металла (стали, титановые сплавы) разработан метод сварки по узкому зазору (щелевой разделке), при которой свариваемые кромки не имеют скоса, а зазор имеет величину 10...12 мм при толщине до 100...150 мм (рис. 2.9, *а*).

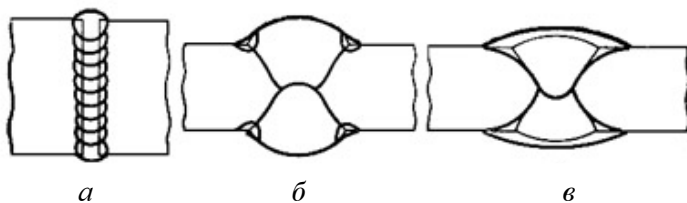


Рис. 2.9. Подготовка кромок и швы в некоторых особых случаях:

а – при сварке металла больших толщин по узкому зазору (по так называемой «щелевой» разделке); *б* – при сглаживании мест перехода металла шва в основной путем наложения «галтельных» швов; *в* – при сварке высокопрочных сталей и сплавов цветных металлов сварочными материалами, которые дают металл шва менее прочный, чем основной

С целью повышения выносливости при действии динамических нагрузок для некоторых соединений из стали и титановых сплавов плавность сопряжения металла шва с основным металлом достигается за счет оплавления мест перехода теплотой дуги, горящей между неплавящимся электродом и основным металлом, как с присадкой, так

и без присадочного материала. В результате образуются галтельные валики, улучшающие внешнюю форму шва (рис. 2.9, б).

Для получения равнопрочного соединения при сварке высокопрочной стали и некоторых сплавов цветных металлов приходится дополнительно наплавлять металл и увеличивать внешнюю часть швов (рис. 2.9, в).

Качество сварных соединений и экономичность процесса сварки зависят от чистоты кромок и прилегающей к ним поверхности основного металла, точности подготовки и сборки под сварку.

2.2. Конструктивные элементы сварных соединений при плазменной, электронно-лучевой и лазерной сварке

Плазменная сварка стали, цветных металлов и сплавов в противовес плазменной резке применяется значительно реже.

Ввиду новизны этих способов сварки и достаточно небольшого объема их применения стандартов на подготовку и сборку сварных соединений, а также на размеры сварных швов, получаемых при этих методах сварки, нет.

Плазменной сваркой можно сваривать стыковые соединения без разделки кромок при δ до 12 мм. При большей толщине требуется разделка кромок.

Электронно-лучевую сварку в вакуумных камерах применяют в основном для некрупных изделий из тугоплавких и активных металлов: титана, циркония, тантала, молибдена и т.д.

Высокая концентрация теплоты, сфокусированной в электронном луче диаметром 1...1,5 мм, способствует малой зоне проплавления, имеет очень малую ширину и значительную глубину, что позволяет выполнять сварку (без разделки кромок) стыковых и нахлесточных соединений на металле больших толщин.

Лазерная сварка используется в радио- и электронной промышленности. Благодаря острой фокусировке возможно сосредоточение большой тепловой энергии на площадках, измеряемых сотыми и тысячными долями миллиметра. Можно создать лазер для сварки очень толстого металла, но процесс плавления металла становится в этом случае практически неуправляемым. Поэтому в настоящее время лазерную сварку применяют для соединения металла сверхмалых толщин (металлическая фольга), проволок малого диаметра и т.д., т.е. изделий, которые не требуют разделки кромок. Типы соединений – нахлесточные и стыковые.

3. СВАРОЧНАЯ ДУГА И ЕЕ СВОЙСТВА

Газы, в том числе и воздух, при нормальных условиях не проводят электрический ток. Объясняется это тем, что в обычных условиях они состоят из нейтральных молекул и атомов, которые не являются носителями зарядов. Они станут электропроводными в том случае, если в своем составе будут иметь электроны, положительные и отрицательные ионы, которые возникают в газах при воздействии на них электрического поля, тепла, при прохождении через газ ультрафиолетовых, рентгеновских и космических лучей, а также лучей, испускаемых радиоактивными веществами.

Прохождение электрического тока через газы называется *электрическим газовым разрядом*. Процесс образования электронов и ионов называется *ионизацией*, а газ, содержащий электроны и ионы, *ионизированным*.

При прохождении электрического тока через газовый промежуток положительные ионы стремятся к отрицательному полюсу (катоде), а отрицательные – к положительному (аноду). При движении некоторые электроны и ионы, сталкиваясь между собой, образуют нейтральные атомы и молекулы. Этот процесс называется *рекомбинацией*.

В электрической дуге энергия источника питания преобразуется в кинетическую и потенциальную энергию частиц плазмы, которая в свою очередь передается электродам и частично превращается в электромагнитное излучение – фотоны, покидающие зону дуги.

Электропроводный газовый канал, соединяющий электроды, имеет форму усеченного конуса или цилиндра. Его свойства на различных

расстояниях от электродов неодинаковы. Тонкие слои газа, примыкающие к электродам, имеют сравнительно низкую температуру. В зависимости от полярности эти слои называются катодной или анодной областями дуги. По ориентировочным данным протяженность l_k (толщина) катодной области $l_k = 10^{-4} \dots 10^{-5}$ см; $l_a = 10^{-3} \dots 10^{-4}$ см. Между приэлектродными областями располагается наиболее протяженная высокотемпературная область разряда – столб дуги (рис. 3.1).

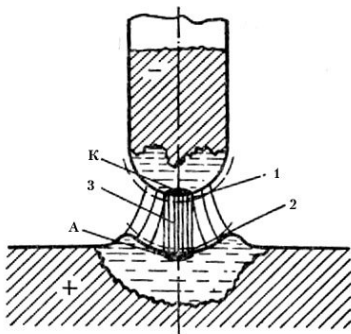


Рис. 3.1. Зоны дугового разряда:

1 – катодная зона; 2 – анодная зона;
3 – столб дуги; К – катод; А – анод

Напряжение распределяется между различными областями неравномерно. Значительное падение напряжения наблюдается в приэлектродных областях, что указывает на высокую напряженность электрического поля в них.

$$E = -\frac{\Delta U}{\Delta l}.$$

Так, в катодной области с $l_k = 10^{-5}$ см и падением напряжения $U_k = 10 \dots 20$ В; напряженность E достигает $E_k = 2 \cdot 10^6$ В/см; $E_a = 10^4$ В/см.

Процессы, протекающие в приэлектродных областях, играют первостепенную роль в механизмах преобразования электрической энергии источников питания в тепловую и передачи ее электродам.

3.1. Столб дуги

Падение напряжения сравнительно невелико, а напряженность поля в нем составляет $10 \dots 50$ В/см.

Диаметр столба дуги, а также температура и напряженность поля в нем определяются внутренними процессами.

Для оценки величины перечисленных параметров столба дуги современная теория использует уравнение баланса энергии единицы длины столба и уравнение термической ионизации газа (уравнение Саха). Кроме того, для дуги справедлив «принцип минимума», утверждающий, что из всех возможных сочетаний столба наиболее устойчиво состояние с минимальной напряженностью поля в нем. Из этих уравнений и изложенного принципа вытекают:

- температура столба, К: $T = 800 U_i$; (3.1)

- напряженность поля, В/см: $E = 2 \cdot 10^8 \frac{U_i^{2,4} \cdot G_e^{0,3}}{I_d^{0,3}}$; (3.2)

- плотность тока, А/м²: $I_{cp} = 5,5 \cdot 10^{-8} \frac{U_i^{3,2}}{G_e^{0,7} \cdot I_d^{0,3}}$, (3.3)

где U_i – потенциал ионизации; G_e – сечение столкновения атомов с электронами.

По I_d и i_{cp} вычислим сечение S (мм²):

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{I_d}{i_{cp}}, \quad (3.4)$$

где d – диаметр столба дуги.

Из уравнений (3.1)–(3.3) видно, что все параметры столба дуги наиболее существенно зависят от потенциала ионизации дугового газа, с ростом которого значительно увеличиваются T , E – поля и i_{cp} тока.

Например, при горении дуги в парах калия ($U_i = 4,33$ эВ) и силе тока $I_d = 200$ А $T_{ст} = 3460$ К, $E_{поля} = 8$ В/см в парах железа ($U_i = 7,83$ эВ) и сила тока $T_{ст} = 6320$ К, $E = 28$ В/см и $i_{cp} = 1800$ А/см².

Чаще всего сварочная дуга горит в смесях многих газов и паров, включающих пары электродов, покрытий, флюсов, воздух, защитные газы и т.д. При *термической* ионизации такие смеси ведут себя подобно некоторому однородному газу с «эффективным потенциалом ионизации $U_{эф}$ », который зависит как от (U_i) компонентов смеси, так и от концентрации (n_i/n). Как показал В.В. Фролов:

$$U_{эф} = -\frac{1}{5800} \ln \sum_i \left(\frac{n_i}{n} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{5800 U_i}{T} \right). \quad (3.5)$$

Из уравнения видно, что наибольшее влияние на величину $U_{эф}$ смеси оказывает тот компонент, который имеет самый низкий U_i .

Например, смесь паров калия ($U_i = 4,33$ эВ) и железа ($U_i = 7,83$ эВ) при одинаковых их концентрациях $n_i/n = 0,5$ и температуре 5800 К – $U_{эф} = 4,63$ эВ. Введение в газ столба 5...8 % присадок с низким U_i существенно снижает $U_{эф}$ смеси и в соответствии с уравнениями (3.1) – (3.3) оказывает сильное воздействие на все параметры столба: снижается T и E поля в нем и увеличивается диаметр.

При сварке неплавящимися электродами в среде защитных газов концентрация различных компонентов смеси неодинакова по длине дуги.

Так, при сварке алюминия в среде аргона дугой с вольфрамовым электродом наиболее высокая концентрация паров алюминия наблюдается у поверхности изделия, наименьшая – у вольфрамового электрода. В результате столб сильно расширен у алюминиевого и сжат у вольфрамового электродов. T , E и плотность тока i_{cp} в различных его сечениях неодинаковы. Это приводит к появлению интенсивных потоков плазмы. Мощность, теряемая столбом дуги, $P_c = E I_c$ частично передается электронам дуги, частично излучается в пространство.

3.2. Анодная область

Температура газа в этой области падает на несколько тысяч градусов от температуры столба T_c до температуры поверхности активного пятна анода. Активной называется лишь та часть поверхности анода, на которую течет ток дуги. Перепад температур ΔT в анодных областях можно определить из уравнения

$$\Delta T = T_c - T_k, \quad (3.6)$$

где T_k – температура кипения материала анода.

При протяженности анодной области 10^{-4} см и $\Delta T = 3 \cdot 10^4$ К градиент температур в ней имеет значение $\Delta T/l_a = 3 \cdot 10^7$ К/см. Это вызывает интенсивный тепловой поток Q в сторону анода:

$$Q = -\eta \frac{\Delta T}{l_a} F_t, \quad (3.7)$$

где η – коэффициент теплопроводности газа; F_t – площадь активного пятна на аноде.

Баланс энергии анодной области выражается соотношением

$$U_a I_d = -\eta \frac{\Delta T}{l_a} F_t. \quad (3.8)$$

Сравнительно низкая средняя температура анодной области указывает на весьма малую вероятность термической ионизации заполняющего ее газа. Заряженными частицами в этой области являются электроны, переносящие ток от столба к аноду.

Величина падения напряжения в анодной области:

$$U_a = 2,65 \cdot 10^2 \frac{\Delta T^{0,6} \eta^{0,6}}{i^{0,4} b_e^{0,2}}, \quad (3.9)$$

где i – средняя плотность тока в анодной области, b_e – подвижность электронов.

Заметное влияние на величину U_a оказывает коэффициент теплопроводности газа, заполняющего анодную область.

Мощность $U_a I_d$, выделяющаяся в анодной области, передается аноду и расходуется на его нагрев и плавление. При силе тока I_d и работе выхода U_v эта разность составляет $U_v I_d$. В результате общая передаваемая аноду мощность равна

$$P_a = (U_a + U_b)I_d. \quad (3.10)$$

Например, в дуге со стальным анодом $U_a = 4,2$ В, а $U_b = 4,36$ В, каждым ампером тока аноду передается мощность $(4,2 + 4,36) \times I = 8,56$ Вт.

3.3. Общие характеристики сварочной дуги

Явление прохождения электрического тока через газы получило название газовых разрядов. Существующие виды разрядов, рис. 3.2, (темновой, тлеющий, дуговой, искровой и коронный) отличаются друг от друга величиной разрядного тока, напряжением, температурой и давлением газа (плазмы) между электродами.

Строгих количественных границ между ними провести не удастся, так как один вид разряда часто переходит в другой без заметного внешнего воздействия. Однако дуговой разряд существенно отличается от других сравнительно большим током (не ниже нескольких ампер), низким напряжением (порядка десятков вольт) и высокой температурой газа в разрядной области.

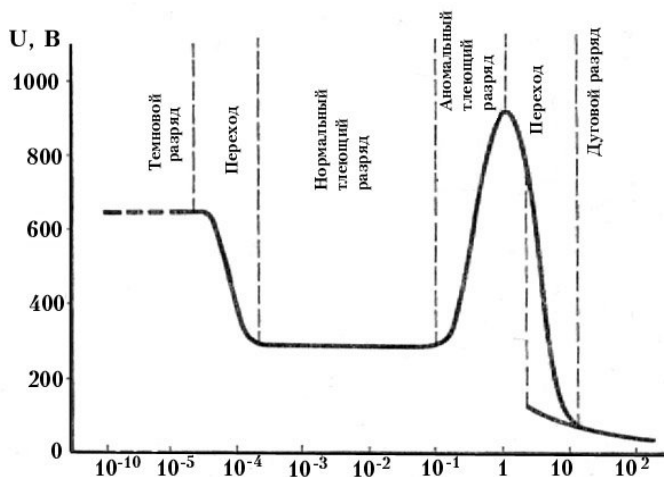


Рис. 3.2. Статическая вольт-амперная характеристика различных видов газового разряда

Дуговые разряды широко используются в технике. В прожекторах и кинопроекторной аппаратуре, в специальных лампах сверхвысокого давления (СВД) до 100 атм. Дуга используется в газотронах, терматронах и ртутных выпрямителях для выпрямления тока и управления его силой и т.д.

Широкое применение электрическая дуга получила в металлургии и сварочной технике для нагрева и плавления металлов. Мы будем рассматривать только сварочные дуги. Они позволяют ввести в подлежащие обработке материалы удельную мощность до 10^5 Вт/см² при пятне нагрева 1...10 мм². Такая концентрация энергии обеспечивает эффективный местный нагрев и расплавление металлов, а также резку и другие виды локальной тепловой обработки изделия.

3.4. Виды сварочных дуг

Различают следующие виды сварочных дуг (см. таблицу):

1	2	3	4	5	6	7
Дуги прямого действия	Дуга с плавящимся электродом	Дуги в парах металлов	Свободные дуги	Установившиеся дуги	Открытые дуги	Дуги постоянного тока
Дуга косвенного действия	С неплавящимся электродом	Дуги в газах	Сжатые дуги	Неуставившиеся дуги	Закрытые дуги	Дуги переменного тока

ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРОЧНЫХ ДУГ

1. В дугах прямого действия подлежащие нагреву или плавлению металлы являются электродами разряда и им передается кинетическая и потенциальная энергия заряженных частиц. Поэтому электроды нагреваются и плавятся. Дуги косвенного действия располагаются у поверхности изделия. Электродами таких дуг служат стержни из графита и вольфрама, несоединенные электрически с изделием. Нагрев и плавление изделий происходит за счет кинетической энергии сталкивающихся с ними частиц газа. Такой нагрев мало эффективен, и применяются такие дуги только тогда, когда требуется небольшая теплопередача от дуги к изделию.

2. Дуги с плавящимися электродами. В процессе плавления электроды оба плавятся, поставляя в сварочную ванну металл. Если один из электродов является тугоплавким – вольфрамовым или графитовым, не поставляя металл в общую ванну, то дуга называется дугой с неплавящимся электродом. При увеличении тока дуги тугоплавкий электрод может плавиться, поэтому разновидности дуг этой группы определяются не только материалом электродов, но и режимом их горения.

3. Большинство плавящихся электродов дуги интенсивно испаряется. Пары почти полностью оттесняют в области разряда другие газы, двигаясь от электродов в виде струи. Поэтому пары электродов определяют основные свойства таких дуг, что и обусловило их название. Когда же используются слабо испаряющиеся электроды (вольфрамовые, графитовые или охлаждаемые водой медные электроды), состав газа разрядной области определяется ее атмосферой. Последнюю образуют либо защитные газы – аргон, гелий, водород, CO_2 и др., подаваемые в зону дуги для защиты сварочной ванны от воздействия воздуха, либо воздух при отсутствии такой защиты. Однако по мере увеличения тока слабо испаряющиеся электроды могут испаряться, а «дуга в газах» может стать «дугой в парах».

4. Дуга считается свободной, если ее развитие в пространстве не ограничено до пределов, определяемых естественными свойствами дуги. При наличии таких ограничений дуга называется сжатой. Дугу сжимают, помещая ее в узких каналах и щелях, ограничивая размеры электродов, обдувая дугу струями газов или жидкостей, и т.д.

5. Дуга считается установившейся, если длительность ее существования при заданных условиях заметно превышает время протекания в ней переходных процессов, и параметры дуги не меняются во времени. Изменение сварочного тока, состава атмосферы, расстояния между электродами, положения в пространстве и т.д. характеризуют неустановившиеся дуги. Однако при сравнительно медленном изменении перечисленных факторов, когда каждому их мгновенному значению соответствуют параметры дуги, близкие к установившимся при этих мгновенных значениях, разделение дуг анализируемой группы на два вида требует их тщательного изучения.

6. Дуга считается открытой, если вокруг не отсутствуют преграды, кроме самих электродов, исключаящие или затрудняющие циркуляцию газа в околосдуговом пространстве. Если полностью дуга изолирована от окружающей среды, то такая дуга закрытая, например, дуга под флюсом, ее атмосфера состоит только из паров электродов и ограждения – флюса.

7. Для дуг постоянного тока характерны неизменность направления тока и, как правило, небольшие колебания его силы, обусловливаемые процессами в дуге.

В дугах переменного тока происходят непрерывные изменения направления и силы тока в соответствии с изменениями ЭДС источника и процессами в дуге. Такие дуги угасают каждый раз при переходе тока через нуль и возобновляются снова в начале каждого полупериода питающего их переменного тока. Реальные сварочные дуги характеризуются одновременно несколькими перечисленными особенностями.

3.5. Зажигание и развитие сварочной дуги

Способы возбуждения дуги

- 1) возбуждение разведением электродов (после их соприкосновения);
- 2) возбуждение дополнительным импульсом высокого напряжения и высокой частоты (от осциллятора). Возможны и другие способы (дополнительной дугой, промежуточной вставкой и т.д.).

Механизм возбуждения дуги

Механизм возбуждения дуги после короткого замыкания связан с тем, что соприкосновение реальных твердых тел при небольшом давлении происходит, как известно, небольшим числом микровыступов. Проходящий через них ток вызывает быстрый нагрев и испарение контактных мостиков, в результате которых возникают два важных для возбуждения дуги процесса.

1. Основания испарившихся выступов разогреваются до температуры кипения, что на некоторых металлах приводит к термоэлектронной эмиссии.

2. После нарушения металлического контакта электроды можно рассматривать как обкладки конденсатора, удаляющиеся друг от друга.

Напряженность поля E между обкладками такого конденсатора при заряде его от источника с напряжением U_0 через сопротивление R в условиях перемещения пластин, площадью S , с ускорением a . Показано, что величина E имеет максимум, определяемый выражением

$$E_{\max} = 9 \cdot 10^8 U_0' R^{-\frac{2}{3}} S^{-\frac{2}{3}} a^{-\frac{1}{3}} \text{ В/см} \quad (3.11)$$

в сварочных цепях $U_0 \approx 50 \text{ В}$; $R \leq 1 \text{ Ом}$, поэтому, приняв площадь микронеровностей $S = 1 \cdot 10^{-6} \text{ см}$ и $a \leq 1 \cdot 10^6 \text{ см/с}^2$, получим $E_{\max} \geq 1,5 \cdot 10^{12} \text{ В/см}$. Эта напряженность больше чем достаточна для мощной электрической эмиссии электронов из любого катода.

Таким образом, оба описанных процесса приводят к появлению в разрядном промежутке свободных электронов. Сталкиваясь с атомами газа, они вызывают их ионизацию, размножение носителей тока и дальнейшее развитие разряда.

4. СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Сварочными или присадочными материалами называются материалы, обеспечивающие возможность протекания сварочных процессов, получения качественного сварного соединения. При электрической сварке плавлением применяются сварочные материалы различной формы, состава и назначения.

Сварочные проволоки, стержни и пластины

Сварочная проволока, а также плавящиеся и неплавящиеся электроды, служат для подвода электрического тока в зону сварки. Кроме того, сварочные проволоки, плавящиеся электродные стержни, пластины и ленты, расплавляясь в процессе сварки, служат дополнительным металлом, участвующим в образовании шва.

Сварочные проволоки

При сварке под флюсом и в защитных газах, а также при ЭШС применяется сварочная проволока без покрытия. При ручной дуговой сварке проволоку рубят на стержни длиной 350...400 мм, и на их поверхность наносят покрытие (называются сварочными электродами). Применяются также литые электродные стержни при сварке цветных металлов, чугуна и в некоторых специальных случаях. Сварочная проволока должна иметь поверхность гладкую и чистую без ржавчины и окалины, масла и других загрязнений.

По виду поверхности проволока подразделяется на неомедненную и омедненную. Омедненная проволока улучшает электрический контакт между проволокой и токоподводящим устройством и снижает возможность ее ржавления. Для предотвращения загрязнения проволока упаковывается в водонепроницаемую бумагу. Обернутые в бумагу мотки, бухты или катушки проволоки упаковываются при диаметре проволоки 0,3...0,8 мм в жесткую тару, выложенную слоем водонепроницаемой бумаги; при диаметре проволоки более 0,8 мм – в полимерную или полиэтиленовую пленку или же в тарную ткань.

Сварочную проволоку следует транспортировать в чистых крытых вагонах, контейнерах или автофургонах, предохраняющих ее от загрязнений и воздействия атмосферных осадков.

Хранить сварочную проволоку нужно в сухих закрытых помещениях в условиях, не допускающих ее ржавления, загрязнения и механических повреждений.

Каждая партия проволоки снабжена сертификатом завода-изготовителя, в котором указаны марка проволоки, результаты химического анализа и других испытаний, масса и номер партии и т.д.

Проволоку стальную сварочную изготавливают по ГОСТ 2246-85 и по специальным техническим условиям. По ГОСТ 2246-85 проволока в зависимости от химического состава подразделяется на низкоуглеродистую, легированную и высоколегированную. По ГОСТ 2246-85 77 предусмотрено марок стальной сварочной проволоки диаметром 0,3...12 мм. Проволока диаметром до 5 мм предназначенная для механизированного способа сварки, поставляется в мотках прямоугольного сечения, пригодных (без перемотки) для использования в сварочных автоматах и полуавтоматах (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Размеры мотков проволоки для механизированной сварки

Размер мотков, мм	Диаметр проволоки, мм				
	0,8...1,6	1,6...2,0	2,0...3,0	3,0	1,6...5,0
Наружный диаметр	175	250	320	320	600
Внутренний диаметр	100	175	220	260	400
Высота	50	55	85	90	90

В условные обозначения марок проволоки входит индекс Св (сварочная) и следующие за ним цифры и буквы. Цифры за индексом (Св)

указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Цифры, следующие за буквенными обозначениями химических элементов, указывают среднее содержание элемента (табл. 4.2) в процентах.

Буква А на конце условных обозначений марок низкоуглеродистой и легированной проволоки указывает на повышенную чистоту металла по содержанию серы и фосфора. В проволоке марки Св – 08 АА содержится не более 0,02 % серы и 0,02 % фосфора. Обозначение проволоки, например, 3 Св – 08 А ГОСТ 2246 – 85. У проволоки с омедненной поверхностью – ставится буква О после марки проволоки. Буква Э – обозначает, что проволока предназначена для изготовления электродов. Буквы Ш, ВД, или ВИ обозначают, что проволока изготовлена из стали, выплавленной электрошлаковым переплавом или вакуумно-дуговым переплавом или же в вакуумно-индукционных печах соответственно.

Таблица 4.2

Условное обозначение легирующих элементов

Элемент	Условное обозначение	Элемент	Условное обозначение
Азот	А*	Медь	Д
Алюминий	Ю	Молибден	М
Бор	Р	Никель	Н
Ванадий	Ф	Ниобий	Б
Вольфрам	В	Селен	Е
Кобальт	К	Титан	Т
Кремний	С	Хром	Х
Марганец	Г		

* Только в высоколегированных проволоках

Проволоки Св–08, Св–08А и Св–0,8АА изготавливаются из кипящей стали. Св–08ГА, Св–10га и Св–10Г2 – из полуспокойной стали. Отличаются в основном друг от друга содержанием марганца, серы и фосфора (табл. 4.3).

В легированных сварочных проволоках содержится до шести легирующих элементов. Например, Св–15ГСТЮЦА, Св–08ХГСМФА. Проволоки Св–15ГСТЮЦА и Св–20ГСТЮА применяются без дополнительной защиты.

Таблица 4.3

Химический состав некоторых марок сварочной проволоки

Марка проволоки	С, не более	Mn	Si	Cr	Ni	S	P	Al
			Не более					
Св–08	0,10	0,35...0,60	0,03	0,15	0,30	0,040	0,040	0,01
Св–08А	0,10	0,35...0,60	0,03	0,12	0,25	0,030	0,030	0,01
Св–08АА	0,10	0,35...0,60	0,03	0,10	0,25	0,020	0,020	0,01
Св–08ГА	0,10	0,80...1,10	0,03	0,10	0,25	0,025	0,030	–
Св–10ГА	0,12	1,10...1,4	0,03	0,20	0,30	0,025	0,030	–
Св–10ГА	0,12	1,5...1,9	0,03	0,20	0,30	0,030	0,030	–

Проволоки, легированные кремнием и марганцем (Св–08Г2С, Св–08ГС), применяются для сварки конструкционных сталей в окислительных защитных газах. Проволоки Св–08ХНМ, Св–08ХМФА, Св–08ХГСМФА и другие применяются для сварки низколегированных высокопрочных сталей. Проволоки других марок используются для сварки сталей, сходного с ними состава и для наплавочных работ.

При содержании в проволоке легирующих элементов более 6 % ее относят к высоколегированным. Например, Св–12Х13, Св–04Х19Н9, Св–07Х19Н10Б, Св–30Х15Н35В3БЗТ, Св–10Х23Н28М3ДЗТ и др.

Стандарт ГОСТ 10543-82 регламентирует 30 марок проволоки для наплавки, из них 9 марок углеродистых, 11 легированных и 10 высоколегированных.

Символ «Нп» означает, что проволока предназначена для механизированной наплавки. После символа «Нп» цифрами указано содержание углерода в сотых долях процента, затем буквами и цифрами – содержание других элементов.

Например, Нп–30 расшифровывается: проволока углеродистая для наплавки со средним содержанием углерода 0,30 % и содержанием других элементов до 2 %; проволока Нп–105Х расшифровывается: проволока для наплавки со средним содержанием углерода 1,05 % и хрома менее 2 %. В стандарте предусмотрены проволоки диаметром

0,3...8,0 мм. Например, полное обозначение проволоки для наплавки имеет вид: проволока ЗНп-105Х ГОСТ 10543-82.

ГОСТ 7871-75 регламентирует химический состав 14 марок тянутой и прессованной проволоки из алюминия от СвА97 до СвА5 ($Al > 99,5 \%$), алюминий-марганцевого сплава (СвАМп), алюминий-магние-вых сплавов (СвАМг3, СвАМг4, СвАМг5, СвАМг6 и др.), алюминий-кремнистых сплавов (СвАК5, СвАК10, Св1201). Диаметры проволок от 0,8 до 12,5 мм.

Пример условного обозначения проволоки по этому ГОСТу: 2-СвАМг ГОСТ 7871-75.

ГОСТ 16130-85 регламентирует химический состав проволоки и прутков из меди и сплавов на медной основе для сварки, наплавки и пайки. Стандарт регламентирует 17 марок проволоки и 12 марок прутков. Символ «Св» не ставится. Диаметр проволоки 0,8...8,0 мм; прутков 6,0 и 8,0 мм.

Для сварки под флюсом применяются проволоки МТ, Бр Х07 и Бр ХТ0,6-0,5; для газoeлектрической сварки – проволоки МНЖКТ 5-1-0,2-0,2 и Бр КМц 3-1.

Проволока для сварки титана

ВТ-1 – содержат до 0,05 % С; 0,3 % Fe; до 0,05 % S; 0,15 % кислорода; 0,04 % азота и 0,01 % водорода.

Химический состав сварочной проволоки для сварки титановых сплавов выбирают исходя из соображений обеспечения прочностных и других свойств сварных соединений.

Порошковая проволока представляет собой трубчатую, часто сложного внутреннего сечения проволоку, заполненную порошкообразным наполнителем (рис. 4.1).

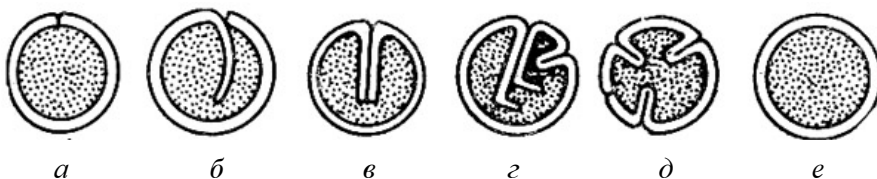


Рис. 4.1. Поперечные сечения порошковых проволок:

a – простая трубчатая; *б* – с одним загибом оболочки; *в* – с двумя загибами оболочки; *г* и *д* – фигурная с повышенной долей металла; *е* – из трубки сплошного сечения (бесповной)

Порошкообразный наполнитель имеет состав, соответствующий покрытиям основного типа с соотношением его массы к массе металлической оболочки в пределах 15...40 %.

Порошковая проволока позволяет создавать газовую и шлаковую защиту металла сварочной ванны от воздуха, обеспечивает легирование металла шва и его очистку от вредных примесей. При сварке порошковой проволокой содержание азота обычно не превышает 0,02...0,025 %, что характеризует надежность защиты сварочной ванны от атмосферного воздуха.

Порошковая проволока применяется как для сварки, так и для наплавки. Широко применяется для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей и наплавочных работ, что обусловлено возможностью варьирования химического состава и массы наполнителя – порошкообразной шихты, обеспечивающей высокое качество сварных соединений.

Порошковую проволоку изготавливают из ленты (рис. 4.2).

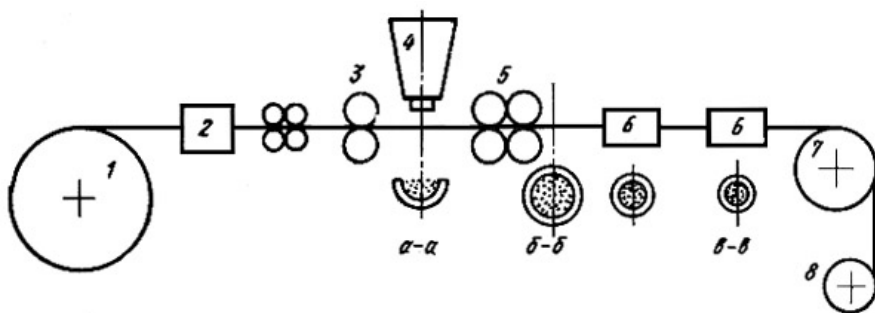


Рис.4.2. Последовательность техпроцесса изготовления порошковой проволоки

Легкодеформируемая лента из рулона 1 подается в специальное очистное устройство 2, откуда поступает в ролики 3, предварительно деформирующие из ленты желоб (сечение а – а). Затем из дозатора 4 желоб наполняется шихтой, попадает в ролики 5, в которых формируется сечение проволоки (сечение б–б и в–в), проходя через фильеры 6, проволока деформируется до меньшего диаметра (2,0...2,5 мм), проходит через волочильный барабан 7 и наматывается на кассету 8.

Для изготовления проволоки меньшего диаметра в последние годы разрабатывают процессы изготовления порошковой проволоки из стальной пластичной сплошного сечения трубки. Трубку необходимого состава предварительно заполняют порошковым наполнителем, а затем через фильеры уменьшают ее диаметр до 1 мм.

Неплавящиеся электроды – угольные, графитовые, вольфрамовые, циркониевые и гафниевые. Все эти материалы относятся к группе тугоплавких. Неплавящиеся электроды служат только для поддержания горения дуги и поэтому должны обладать высокой стойкостью при высоких температурах (расход их должен быть минимальным).

Основные марки порошковых проволок и их название приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Основные марки порошковых проволок

Марка проволоки	Назначение
ПП–АН1	Механизированная сварка низкоуглеродистых сталей в нижнем положении
ПП–АН3	Механизированная сварка низкоуглеродистых и низколегированных сталей в нижнем положении
ПП–АН7	То же – для сварки в любых пространственных положениях
ПП–1Х14Т–0	Механизированная наплавка уплотнительных поверхностей арматуры
ПП–3Х13–0	Механизированная наплавка деталей, работающих в условиях трения металла о металл
ПП–200Х10Г80	Механизированная наплавка деталей, работающих в условиях износа и удара
ПП–1Х18Н9С6Г2	Механизированная наплавка деталей, работающих в условиях высоких давлений и температур
ПП–25Х5ФМС	Механизированная наплавка деталей, работающих в условиях циклической термической нагрузки и износа
ПП–50ХН2МФ	Механизированная наплавка деталей, работающих в условиях высоких ударных нагрузок
ПП–У20Х12ВФ	Механизированная наплавка деталей, работающих в условиях износа и удара
ППК–300	Наплавка крановых колес под флюсом
ПП–Х6Г5СЮ–1	Наплавка молотков дробилки

Графитовые и угольные электроды различаются строением углерода. В графитовых электродах углерод имеет кристаллическое строение, а в угольных – аморфное.

Для угольных электродов электрическое сопротивление кубика с ребром в 1 см – 0,0032 Ом, для графитового – 0,0008 Ом. Температура начала окисления на воздухе угольного электрода 500 °С, графитового 640 °С. Следовательно, по этим показателям предпочтительно применение графитовых электродов.

Температура кипения углерода (4500 К) обеспечивает его малый расход за счет испарения, но при взаимодействии с воздухом происходит его окисление и угар с возможным науглероживанием сварочной ванны. Чтобы уменьшать разогрев угольных и графитовых электродов, увеличивают их сечения (6...20 мм), что затрудняет действия сварщика.

Наиболее широкое применение для сварки имеют вольфрамовые (тугоплавкие) электроды диаметром 1...6 мм с высокой механической прочностью и наибольшим электрическим сопротивлением. Температура плавления вольфрама 3377 °С, температура кипения 4700 °С. Вольфрамовые стержни изготавливают из порошка (чистотой 99,7 %), которые прессуют, спекают и проковывают. Заготовки подвергают волочению для получения стержней необходимых диаметров. Вольфрамовые электроды изготавливают из чистого вольфрама и с присадками окислов лантана или иттрия, а также металлического тантала. Окислы тантала или иттрия в небольшом количестве резко увеличивают эмиссионную способность вольфрама – катода, в результате чего возрастает стойкость электродов, повышается стабильность горения дуги.

Циркониевые и гафниевые электроды используются в плазмотронах при тепловой резке металлов.

Сварочные покрытые электроды для дуговой сварки и наплавки

Электроды представляют собой стержни длиной до 450 мм, изготовленные из сварочной проволоки (ГОСТ 2246-85), на поверхность которых нанесен слой покрытия различной толщины.

Покрытие предназначено для повышения устойчивости горения дуги, образования комбинированной газшлаковой защиты, легирования и рафинирования металла. В состав покрытий электродов входят различные материалы (компоненты).

1. Газообразующие компоненты – органические вещества: крахмал, пищевая мука, декстрин либо неорганические вещества, обычно карбонаты (мрамор CaCO_3 , магнезит MgCO_3 и т.д.).

2. Легирующие элементы и элементы-раскислители: кремний, марганец, титан и др. (в виде сплавов этих элементов с железом (ферросплавы)).

3. Ионизирующие или стабилизирующие компоненты, содержащие элементы с низким потенциалом ионизации, а также различные соединения, в состав которых входят калий, кальций, мел, полевой шпат, гранит и др.

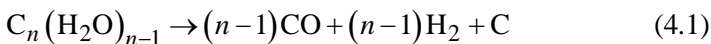
4. Шлакообразующие компоненты (марганцовые, титановые руды) и минералы (гельменитовый и рутиловый концентраты, полевой шпат, кремнезем, гранит, мрамор, плавиковый шпат и др.).

5. Связующие – водные растворы силикатов *натрия* или *калия*, называемые натривым или калиевым жидким стеклом.

6. Формовочные добавки – вещества, придающие обмазочной массе лучшие пластические свойства – бентонит, каолин, декстрин, слюда и др.

В покрытие электродов вводится до 60 % железного порошка с целью повышения производительности сварки и увеличения количества дополнительного металла, вводимого в шов.

Газовая защита образуется в результате диссоциации органических веществ при $T > 200^\circ\text{C}$.



диссоциации карбонатов при температуре около 900°C (при парциальном давлении в газовой фазе $P_{\text{CO}_2} \approx 1 \text{ кгс/см}^2$)



а также последующей диссоциации CO_2



Расчеты показывают, что при $T = 0^\circ\text{C}$ и давлении 1 кгс/см^2 диссоциация 1 г органических соединений приводит к выделению примерно $1450 \text{ см}^3 \text{ CO} + \text{H}_2$, а 1 г карбоната CaCO_3 – к выделению 340 см^3 газов. В дуге газы нагреваются до $T = 550 \dots 800^\circ\text{C}$; объем,

выделившихся при этих температурах газов составляет 1000...1400 см³ (при нагреве газа на 1 °С его объем увеличивается на 1/273).

На 1 г расплавленного электродного стержня выделяется 90...120 см³ защитного газа (СО₂ и Н₂), что обеспечивает надежную защиту сварочной ванны.

Состав шлакообразующих компонентов может быть различным; это окислы кальция, магния, марганца, железа, алюминия, кремния, титана, натрия, галогены СаF₂ и др.

Для сварки алюминия и алюминиевых сплавов применяются покрытия из бескислородных соединений, хлоридов и фторидов (KCl, NaCl, KF и др). применение окислов недопустимо для покрытий электродов, ввиду большого сродства алюминия к кислороду.

Требования к толстым покрытиям электродов:

- 1) обеспечение стабильного горения дуги;
- 2) облучение металла шва с необходимым химическим составом и свойствами;
- 3) спокойное, равномерное плавление электродного стержня и покрытия;
- 4) хорошее формирование шва и отсутствие в нем пор, шлаковых включений и др.;
- 5) легкая делимость шлака после остывания с поверхности шва;
- 6) хорошие технологические свойства обмазочной массы, не затрудняющие процесса изготовления электродов;
- 7) удовлетворительные санитарно-гигиенические условия труда при изготовлении электродов и сварке.

Технологические характеристики плавления электродов определяются экспериментально.

Коэффициент расплавления (г/А·ч)

$$\alpha_p = \frac{G_p}{I t}, \quad (4.5)$$

где G_p – масса расплавленного металла электрода (г) за время t горения дуги (ч); I – сила сварочного тока, А.

$$G_p = G_{\text{ст.эл}} + G_{\text{доп.м}}, \quad (4.6)$$

где $G_{\text{ст.эл}}$ – масса электрода; $G_{\text{доп.м}}$ – масса расплавленного дополнительного металла, содержащегося в покрытии электрода.

Коэффициент наплавки (г/А·ч)

$$\alpha_{\text{н}} = \frac{G_{\text{н}}}{It}, \quad (4.7)$$

где $G_{\text{н}}$ – масса наплавленного металла (г) при силе сварочного тока I (А) за время t (ч), полученного за счет дополнительного металла, если он содержался в покрытии электрода.

Коэффициент потерь (%)

$$\psi = \frac{G_{\text{р}} - G_{\text{н}}}{G_{\text{р}}} \cdot 100 \%, \quad (4.8)$$

если в покрытии содержится дополнительный металл,

$$\psi_1 = \frac{(G_{\text{ст.эл}} + G_{\text{доп.м}}) - G_{\text{н}}}{(G_{\text{ст.эл}} + G_{\text{доп.м}})} \cdot 100 \%. \quad (4.9)$$

Коэффициент массы покрытия $k = G_{\text{п}}/G_{\text{м}}$,

где $G_{\text{п}}$ – масса покрытия на электроде; $G_{\text{м}}$ – масса металла стержня на длине обмазочной части электрода.

Если известна масса 1 см электродной проволоки m (г/см), то $k = (G_{\text{эл}} - ml_0)/ml_0$, где $G_{\text{эл}}$ и $l_{\text{эл}}$ – масса всего электрода (г) и его длина (см); l_0 – длина обмазочной части электрода, см.

Иногда массу покрытия на электроде относят к массе всего электрода:

$$k_1 = (G_{\text{эл}} - ml_0)/ml_0 \quad (4.10)$$

для электродов, не содержащих в покрытии дополнительный металл, $\alpha_{\text{р}} = 7 - 13$ г/А·ч; $\alpha_{\text{н}} = 6 - 12,5$ г/А·ч; $\psi = 5 - 25$ %.

Рассмотренные характеристики электродов используют для нормирования сварочных работ и расхода электродов.

Например, если известно $F_{\text{н}}$ и длина шва $l_{\text{ш}}$, то $G_{\text{н}} = F_{\text{н}}l_{\text{ш}}\gamma$, где γ – плотность металла, г/см³.

В паспорте на выбранную марку электродов указывается сила сварочного тока и коэффициенты $\alpha_{\text{р}}$, $\alpha_{\text{н}}$, ψ и k .

Основное время сварки определяют по формуле

$$T_0 = t = G_{\text{н}}/\alpha_{\text{н}}I. \quad (4.11)$$

Массу электродов, необходимых для сварки данного шва:

$$G_{\text{эл}} = G_{\text{н}}k_1(l + \psi). \quad (4.12)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулов А.И., Бельчук Г.А., Демянцевич В.П. Технология и оборудование сварки плавлением. Учебник для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 1977. – 432 с.
2. Теория сварочных процессов: Учебник / Под ред. В.В. Фролова. – М.: Высшая школа, 1988. – 559 с.
3. Оборудование для дуговой сварки: Справочное пособие/ Под ред. В.В. Смирнова. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1986. – 656 с
4. Чвертко А.И. Флюсовая аппаратура для автоматической и механизированной сварки. – М.: Машиностроение, 1986. – 160 с.
5. Электронно-лучевая сварка / О.К. Назаренко, А.А. Кайдалов, С.Н. Колбасенко и др.; Под ред. Б.Е. Патона. – Киев: Наукова думка, 1987. – 256 с.
6. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
7. Сварочные материалы для дуговой сварки: справочное пособие. В 2 т. Т.1. Защитные газы и сварочные флюсы / Под общ. ред. Н.Н. Потапова. – М.: Машиностроение, 1989. – 544 с.
8. Ленивкин В.А., Дюргеров Н.Г., Сагиров Х.Н. Технологические свойства сварочной дуги в защитных газах. – М.: Машиностроение, 1989. – 264 с.
9. Сварка и свариваемые материалы: в 3 т. Т. 1. Свариваемость материалов. Справ. изд. / Под ред. Э.Л. Макарова. – М.: Металлургия, 1991. – 528 с.
10. Сварочные материалы для дуговой сварки: справочное пособие. В 2 т. Т. 2. Сварочные проволоки и электроды / Под общ. ред. Н.Н. Потапова. – М.: Машиностроение, 1993. – 768 с.
11. Сварка и свариваемые материалы: в 3 т. Т. 2. Технология и оборудование. Справ. изд./ Под ред. В.М. Ямпольского. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996. – 574 с.
12. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет К.В. Фролов (пред.) и др. – М.: Машиностроение. – МЗ8. Оборудование для сварки Т. IY-6/ В.К. Лебедев, С.И. Кучук-Яценко, А.И. Чвертко и др.; Под ред. Б.Е. Патона. 1999. – 496 с.

Е.В. Харламова

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ**

Конспект лекций

Редактор *Н.Н. Ветчакова*
Технический редактор *Н.В. Белова*
Компьютерная верстка *Г.И. Якименко*

Подписано в печать	27.06.2006.	Формат 60 x 84 1/16.	Бумага офсетная
Тираж	экз.	Уч.-изд. л.	Печ. л.
Заказ №			Изд. № 189.
			Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20